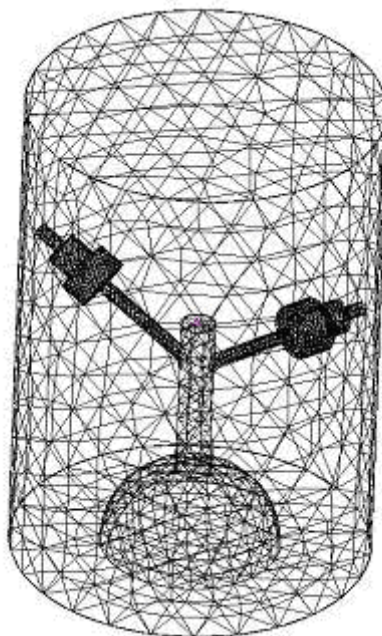




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

**«Έμμεσος προσδιορισμός του Συντελεστή Μετάδοσης Θερμότητας
κατά τη Χύτευση Ακριβείας»**



Πελεκάνος Ευάγγελος

Επιβλέπων: Δ. Ι. Παντελής , Καθηγητής
Αθήνα, Φεβρουάριος 2009

Η εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας ξεκίνησε το Σεπτέμβριο του 2007 και ολοκληρώθηκε το Μάιο του 2008. Σε όλη τη διάρκεια αυτή είχα τη δυνατότητα να ασχοληθώ με νέα και άγνωστα για εμένα πεδία, αποκομίζοντας σημαντικές γνώσεις τόσο σε επιστημονικό όσο και σε προσωπικό επίπεδο.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Καθηγητή κ. Δ. Παντελή για τις συμβουλές, τις παρατηρήσεις και την καθοδήγησή του κατά την εκτέλεση της εργασίας.

Επίσης ευχαριστώ ιδιαίτερα την υποψήφια Διδάκτορα κ. Α. Βασιλείου για τη σημαντικότερη βοήθειά της μέχρι το πέρας της διπλωματικής.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω, εκ των προτέρων, τον Καθηγητή κ. Β. Παπάζογλου και τον Αναπλ. Καθηγητή κ. Ν. Τσούβαλη για την ανάγνωση και αξιολόγηση της εργασίας.

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένειά μου για τη συμπαράστασή της σε όλα τα χρόνια των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι ο προσδιορισμός του Συντελεστή Μετάδοσης Θερμότητας (Σ.Μ.Θ) κατά τη χύτευση ακριβείας. Ο Σ.Μ.Θ είναι βασικός παράγοντας του μηχανισμού μεταφοράς θερμότητας από το τηγμένο κράμα προς το καλούπι και ακολούθως προς το περιβάλλον. Το κράμα που χρησιμοποιήθηκε ήταν Ορείχαλκος CuZn30 και η παρασκευή των χυτών έγινε με δύο πρέσες χύτευσης: την πρέσα βαρύτητας και τη φυγοκεντρική χυτόπρεσα με την οποία είχαμε τη δυνατότητα μεταβολής της ταχύτητας περιστροφής της. Ο προσδιορισμός του Σ.Μ.Θ, απαιτεί τη χρήση θερμοστοιχείων για τη μέτρηση θερμοκρασιών σε συγκεκριμένα σημεία του χυτού κατά την εκτέλεση πειραμάτων χύτευσης.

Οι παραπάνω πειραματικές διαδικασίες προσομοιώθηκαν μέσω του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων PROCAST σε H/Y, στο οποίο μια από τις παραμέτρους της χύτευσης που πρέπει να οριστεί είναι και η τιμή του Σ.Μ.Θ. Εξαιτίας του ότι δεν υπάρχουν στοιχεία στη βιβλιογραφία, πραγματοποιήθηκαν συνεχείς δοκιμές τόσο με σταθερές όσο και με χρονικά μεταβαλλόμενες τιμές του Σ.Μ.Θ έως ότου η υπολογιστική καμπύλη απόψυξης να ταυτίζεται, κατά το δυνατόν καλύτερα, με αυτήν που προέκυψε από τα πειράματα. Έτσι, καταλήξαμε στην εύρεση συγκεκριμένης τιμής του Σ.Μ.Θ για τη χύτευση βαρύτητας και σε πέντε διαφορετικές τιμές για τη φυγοκεντρική χύτευση, που αντιστοιχούν σε συγκεκριμένες ταχύτητες περιστροφής του καλουπιού. Επιπλέον, για τις ίδιες ταχύτητες περιστροφής υπολογίστηκαν πέντε τιμές του Σ.Μ.Θ σε διαφορετικά σημεία του χυτού.

Γνωρίζοντας συγκεκριμένες τιμές, η έρευνα συνεχίστηκε ώστε να διαπιστωθεί η επίδραση βασικών παραμέτρων της χύτευσης, όπως η αρχική θερμοκρασία τήγματος, η αρχική θερμοκρασία καλουπιού, η ταχύτητα και η επιτάχυνση φυγοκέντρισης, στην ποιότητα των παρασκευαζόμενων χυτών, στο χρόνο στερεοποίησης και στο ποσοστό πορώδους. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν ήταν πολύ ικανοποιητικά. Αρχικά επιβεβαιώθηκε η θεωρητική συμπεριφορά του Σ.Μ.Θ ο οποίος μεταβάλλεται σε τρία χρονικά στάδια. ενώ κατέστη εμφανής η ισχυρή επίδραση στην τιμή του, πλήθους παραγόντων, όπως το είδος της χύτευσης, το σημείο του χυτού που αναφερόμαστε και η αρχική θερμοκρασία τήγματος.

Τέλος, με τη γνώση και τη συλλογή των δεδομένων που αποκτήθηκε, προτείνεται η περαιτέρω έρευνα του Σ.Μ.Θ, με χρήση περισσότερων θερμοστοιχείων και διαφορετικών μηχανών χύτευσης και με χρήση αριθμητικού μοντέλου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σκοπός της εργασίας / συνοπτική περιγραφή

Ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας (HTC) είναι θεμελιώδους σημασίας παράγοντας, τόσο για τη βιομηχανία χύτευσης, όσο και για τη διαδικασία στερεοποίησης. Για το λόγο αυτό έχει μελετηθεί εκτενώς κατά τις τελευταίες τρεις δεκαετίες, γεγονός που οδήγησε στην κατασκευή χυτών με ολοένα και καλύτερες ιδιότητες. Ωστόσο ακόμα και σήμερα είναι δύσκολο για τους μηχανικούς να χρησιμοποιήσουν συγκεκριμένο συντελεστή σε μια συγκεκριμένη εφαρμογή. Η δυσκολία προκύπτει από το γεγονός ότι ο Συντελεστής Μετάδοσης Θερμότητας εξαρτάται από πλήθος φυσικών και χημικών παραγόντων, τόσο του χρησιμοποιούμενου μετάλλου όσο και της μεθόδου χύτευσης που ακολουθείται. Επιπλέον η ποικιλία νέων εξελιγμένων τεχνικών χύτευσης προσφέρει αντικείμενα μεγαλύτερης ακρίβειας και ποιότητας, καθιστώντας αναγκαιότερη αλλά και δυσκολότερη τη μελέτη του H.T.C.

Οι πρώτες προσπάθειες για τη μελέτη του συντελεστή μετάδοσης θερμότητας έγιναν στις αρχές της δεκαετίας του 1960 και χρησιμοποιούσαν αριθμητικές μεθόδους μοντελοποίησης για τη διαδικασία στερεοποίησης. Με την εξάπλωση των ηλεκτρονικών υπολογιστών αναπτύχθηκαν πολλές εφαρμογές προσομοίωσης της χύτευσης, οι οποίες κάνουν χρήση βάσεων δεδομένων από την εκτέλεση πειραματικών διαδικασιών και λαμβάνουν υπ' όψη την εξάρτηση του HTC από τη θερμοκρασία, το χρόνο και το υλικό του καλουπιού.

Η ανάπτυξη τέτοιων προγραμμάτων έχει ως στόχο τα ακόλουθα:

- A) Να προσφέρει οδηγίες στους μηχανικούς της βιομηχανίας μετάλλων για ακριβείς τιμές του συντελεστή μετάδοσης θερμότητας
- B) Να συγκεντρώσει τη γνώση και τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις εφαρμογές του HTC στις εταιρίες και τις βιομηχανίες
- Γ) Να βοηθήσει με απλό τρόπο το χρήστη ενός τέτοιου προγράμματος να προσεγγίσει την τιμή του HTC.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι ο προσδιορισμός συγκεκριμένης τιμής του Συντελεστή Μετάδοσης Θερμότητας για κράμα Ορείχαλκου Cu70Zn30 κατά τη Χύτευση Ακρίβειας. Οι διαδικασίες της χύτευσης αφορούσαν στη

χύτευση Βαρύτητας και στις Φυγοκεντρική χύτευση. Έτσι είναι δυνατή η μελέτη και η βελτιστοποίηση μελλοντικών εφαρμογών χύτευσης, με τις παραπάνω μεθόδους, μέσω της προσομοίωσής τους σε πρόγραμμα H/Y, απαλείφοντας την ανάγκη εκτέλεσης πειραματικών διαδικασιών. Επιτυγχάνεται με αυτόν τον τρόπο μείωση του χρόνου και του κόστους που απαιτούνται για την παραγωγή αντικειμένων. Ταυτόχρονα μελετάται ευκολότερα η επίδραση βασικών παραμέτρων της χύτευσης, γεγονός που οδηγεί σε παραγωγή χυτών καλύτερης ποιότητας και μηχανικών ιδιοτήτων.

Για το λόγο αυτό, στην παρούσα μελέτη που πραγματοποιήθηκε, ένα μεγάλο μέρος της ήταν αφιερωμένο στον πειραματικό προσδιορισμό του Συντελεστή Μετάδοσης Θερμότητας. Πρόκειται για ένα μέγεθος που περιγράφει το ρυθμό μετάδοσης της θερμότητας από το τήγμα στο καλούπι και αποτελεί κύρια παράμετρο της προσομοίωσης. Για να μπορούν να έχουν βάση τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων ήταν αναγκαίο ο Συντελεστής αυτός να λαμβάνει ρεαλιστικές τιμές. Η βιβλιογραφία, όμως, δεν παρείχε καμία πληροφορία για την τιμή του για το συγκεκριμένο κράμα και το συγκεκριμένο είδος χύτευσης. Έτσι, για τον προσδιορισμό του Συντελεστή Μετάδοσης έγινε λήψη μετρήσεων θερμοκρασιών με τη χρήση θερμοστοιχείων η οποία ακολουθήθηκε από ένα πλήθος προσομοιώσεων μέχρι να βρεθεί, έπειτα από πολλές δοκιμές, ο συντελεστής που δίνει την ίδια θερμοκρασιακή εξέλιξη στο μέταλλο με αυτήν που μετρήθηκε.

Η διαδικασία λήψης μετρήσεων θερμοκρασιών με χρήση θερμοστοιχείων γενικά απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή. Η ιδιαιτερότητα στην παρούσα μελέτη ήταν ότι το θερμοστοιχείο έπρεπε να τοποθετηθεί στο φυγοκεντριζόμενο καλούπι και έτσι απαιτήθηκε ειδική, πρωτότυπη τροποποίηση της χυτόπρεσας ώστε να καταστεί αυτό δυνατόν.

Εν συνεχεία, ακολούθησε η μελέτη των συνθηκών που επικρατούν στη χύτευση βαρύτητας και στη φυγοκεντρική χύτευση. Τα πειράματα και ο μεγάλος αριθμός προσομοιώσεων οδήγησαν στη διατύπωση συμπερασμάτων για την επίδραση των παραμέτρων της χύτευσης που επιδρούν στην ποιότητα του τελικού προϊόντος.

Πιο αναλυτικά, οι παράμετροι της φυγοκεντρικής χύτευσης ακριβείας που μελετήθηκαν ήταν η αρχική θερμοκρασία καλουπιού, η αρχική θερμοκρασία τήγματος και επιπλέον για τη φυγοκεντρική χύτευση η ταχύτητα περιστροφής, η διάρκεια φυγοκέντρισης και η επιτάχυνση. Το πρώτο στάδιο της μελέτης ήταν η διεξαγωγή

πειραμάτων, όχι μόνο για εξοικείωση με τη διαδικασία και τις χυτόπρεσες αλλά και για διερεύνηση της δυνατότητας ελέγχου, από τον χρήστη, των παραμέτρων αυτών. Για μεγέθη όπως η αρχική θερμοκρασία τήγματος, δεν υπάρχει τις περισσότερες φορές ένδειξη στη χυτόπρεσα. Επειδή, ωστόσο αποτελεί βασικό παράγοντα της εργασίας, έγινε χρήση θερμοστοιχείων και οπτικού πυρόμετρου, ώστε να διευκρινιστεί ποιες ρυθμίσεις της μηχανής θα δώσουν συγκεκριμένη θερμοκρασία τήγματος.

Για την ολοκλήρωση της εργασίας, πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις για πέντε ταχύτητες περιστροφής, πέντε διαφορετικές θερμοκρασίες καλουπιού, πέντε διαφορετικές θερμοκρασίες τήγματος και τρεις επιταχύνσεις, ώστε να διερευνηθεί η επίδραση κάθε παραμέτρου. Η προσομοίωση της διαδικασίας της χύτευσης έγινε με τη χρήση του προγράμματος PROCAST®, τα αποτελέσματα του οποίου παρουσιάζονται εκτενώς σε επόμενο κεφάλαιο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

2.1. Χύτευση

- 2.1.1. Γενικά περί Χύτευσης (Ορισμός, Είδη χύτευσης, Πλεονεκτήματα)
- 2.1.2. Χύτευση με τη Μέθοδο του Χαμένου Κεριού
- 2.1.3. Φυγοκεντρική Χύτευση
- 2.1.4. Συντελεστής μετάδοσης θερμότητας
- 2.1.5. Δεδομένα από τη διεθνή βιβλιογραφία για τον υπολογισμό του Σ.Μ.Θ.

2.2. Προσομοιώσεις

- 2.2.1. Σύντομη περιγραφή της λογικής και των χαρακτηριστικών του Procast
- 2.2.2. Δεδομένα από τη διεθνή βιβλιογραφία για τη φυγοκεντρική χύτευση

2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

2.1. Χύτευση

2.1.1. Γενικά περί χύτευσης

2.1.1.1. Ορισμός χύτευσης-Στερεοποίησης:

Ήδη από το 4000 π.Χ έχουμε αναφορές για τη χρήση τεχνικών χύτευσης από τους Αιγύπτιους για τη μορφοποίηση κυρίως μπρούντζινων και χάλκινων αντικειμένων. Πολύ αργότερα, το 600 π.Χ έχουμε τα πρώτα χυτά από σίδηρο και μόλις το 500 μ.Χ παρασκευάστηκαν χυτευτά χωνευτήρια από ατσάλι. Παρόλη τη γρήγορη ανάπτυξη που έλαβε χώρα κυρίως στην Ασία, η χύτευση στην Ευρώπη δεν ήταν ιδιαίτερα διαδεδομένη μέχρι και τα μέσα του 18^{ου} αιώνα όπου και εισήχθη το κοκ ως καύσιμη ύλη στα χυτήρια, μειώνοντας δραστικά το κόστος παραγωγής. Ένας πλήρης ορισμός της χύτευσης είναι ο εξής:

«Η χύτευση αποτελεί κατεργασία διατήρησης της μάζας κατά την οποία το υλικό που βρίσκεται σε τετηκυία κατάσταση, διοχετεύεται σε κατάλληλα προετοιμασμένη κοιλότητα (καλούπι) όπου και στερεοποιείται » [1]

Με τις σημερινές τεχνικές χύτευσης έχουμε τη δυνατότητα να παρασκευάσουμε από πολύ μικρού μεγέθους μέχρι τεραστίων διαστάσεων και δεκάδων τόνων βάρους, αντικείμενα. Η διαδικασία λαμβάνει χώρα στα χυτήρια, χρησιμοποιώντας τα κατάλληλα καλούπια και συγκεκριμένο τήγμα, ανάλογα με τη μορφή και τις ιδιότητες που επιθυμούμε να έχει το χυτό.

Η μικροδομή του κατασκευαζόμενου τεμαχίου (πλίνθωμα) εξαρτάται από τους παρακάτω παράγοντες:

1. Τη χυτευσιμότητα του τήγματος, δηλαδή το πόσο καλά πληροί τον τύπο της χύτευσης
2. Το ιξώδες

3. Την επιφανειακή τάση
4. Τη δημιουργία επιφανειακής μεμβράνης οξειδίων
5. Τα διαλυμένα αέρια, τις σκουριές και τα εγκλείσματα
6. Τον τρόπο στερεοποίησης και κρυστάλλωσης

Η χυτευσιμότητα του τήγματος επηρεάζεται από ορισμένες παραμέτρους όπως είναι:

1. Το σχήμα του προς χύτευση τεμαχίου
2. Η πίεση υπό την οποία πραγματοποιείται η χύτευση
3. Η κατάσταση των παρειών του αποτυπώματος
4. Ο ρυθμός χύτευσης
5. Ο βαθμός υπερθέρμανσης

Στερεοποίηση:

Η ζώνη στερεοποίησης του τηγμένου μετάλλου αναπτύσσεται συναρτήσει του χρόνου, ξεκινώντας από την εξωτερική επιφάνεια που βρίσκεται σε επαφή με τα τοιχώματα του καλουπιού και συνεχίζει προς το εσωτερικό του τήγματος απόχυσης. Η μεταφορά θερμότητας δηλαδή πραγματοποιείται από τα ήδη στερεοποιημένα τμήματα προς τα εσωτερικά τοιχώματα του τύπου και από τα τοιχώματα του τύπου προς το περιβάλλον. Οι συνθήκες πήξης και απόψυξης του μετάλλου επηρεάζουν την δημιουργία των ζωνών στερεοποίησης, οι οποίες είναι οι παρακάτω:

1. Μικροκρυσταλλική ζώνη: όπου λόγω της ταχείας απόψυξης έχουμε λεπτόκοκκη δομή
2. Βασαλτική ζώνη: ο ρυθμός απόψυξης μειώνεται και ξεκινά η δημιουργία δενδριτικών κρυστάλλων
3. Ισοαξονική ή κεντρική ζώνη: συναντάται στην καρδιά του πλινθώματος όπου η ψύξη είναι πολύ αργή και επομένως σχηματίζονται λίγοι κόκκοι

Ένα σημαντικό φαινόμενο που συμβαίνει κατά τη φάση της στερεοποίησης, είναι η ελάττωση του ειδικού όγκου του μετάλλου λόγω συστολής του. Στον ακόλουθο πίνακα φαίνεται το ποσοστό της συνολικής συστολής ανάλογα με το χρησιμοποιούμενο κράμα.

Πίνακας 1: Ποσοστό συρρίκνωσης του χρησιμοποιούμενου κράματος, κατά τη φάση της στερεοποίησης

A/A	ΧΑΛΥ ΒΑΣ	ΧΥΤΟ ΣΙΔΗΡΟΣ	ΧΑΛΚΟΣ	ΑΛΟΥΜΙ ΝΙΟ	ΜΑΓΝΗΣΙΟ	ΨΕΥΔΑΡ ΓΥΡΟΣ	ΚΑΣΣΙ ΤΕΡΟΣ	ΑΡΓΥ ΡΟΣ
%	2,3	3	2	1,7	1,8	1,6	0,48	2,1

Η υποχώρηση εκ συστολής αναπτύσσεται σε τρία στάδια:

- Κατά την υγρή κατάσταση του μετάλλου: όπου η υποχώρηση είναι αμελητέα
- Κατά τη στερεοποίηση: όπου έχουμε τη δημιουργία διακένωσης λόγω της στρωματικής στερεοποίησης. Εμφανίζεται δηλαδή ένα κοίλωμα κωνικής μορφής στην περιοχή του χυτού που στερεοποιείται τελευταία.



Σχήμα 2.1: Η δημιουργία διακένωσης κατά τη στερεοποίηση

- Μετά την ολοκλήρωση της στερεοποίησης: Στο στάδιο αυτό έχουμε ανάπτυξη μηχανικών εσωτερικών τάσεων λόγω διαφορετικού συντελεστή συστολής ανάμεσα στις θερμές και τις ψυχρές περιοχές του χυτού. Για τη μείωση των τάσεων γίνεται αποτατική ανόπτηση.

2.1.1.2. Ελαττώματα Πλινθωμάτων

Κατά τη διαδικασία της χύτευσης είναι συνήθης η παρουσία ελαττωμάτων που καταστρέφουν το τελικό προϊόν. Αυτά οφείλονται είτε σε χημικά φαινόμενα (διαφορισμός) είτε σε φυσικά και τυχαία αίτια. Σημαντικά είναι επίσης και τα σφάλματα που επέρχονται από λανθασμένη εκτέλεση της χύτευσης. Οι κυριότερες κατηγορίες ελαττωμάτων είναι:

1. Αέρια εγκλείσματα τα οποία προέρχονται από την υπερθέρμανση του τήγματος και προκαλούν σπηλαιώσεις και φυσαλίδες.
2. Μη μεταλλικά εγκλείσματα: είναι ακαθαρσίες σκουριάς και σωματίδια που εμφανίζονται σε κακής ποιότητας μέταλλο.
3. Ρωγματώσεις: προκαλούνται από την απότομη συστολή του ρευστού και την ανάπτυξη εσωτερικών τάσεων.
4. Ασυνέχειες: λόγω διακοπτόμενης απόχυσης του τήγματος στο καλούπι ή κακής τοποθέτησης του δευτερεύοντος αγωγού.
5. Παραμορφώσεις-εξογκώματα: οφείλονται στην πολυπλοκότητα του χυτού ή στην κακή του τοποθέτηση.
6. Τραχεία επιφάνεια – ρυτιδώσεις: προέρχονται από την κακή ποιότητα ή την υπερθέρμανση του ρευστού αλλά και από την ακατάλληλη θερμοκρασία του καλουπιού.

Κατά τη διάρκεια της χύτευσης λαμβάνουν χώρα πλήθος χημικών, φυσικών και θερμοδυναμικών φαινομένων. Η ανάπτυξη μηχανικών και συνεκτικών δυνάμεων είναι πολύ πιθανό να προκαλέσουν ανομοιογένειες και σφάλματα στο χυτό, γεγονός που ενισχύεται αν συμπεριλάβουμε και τον ανθρώπινο παράγοντα που είναι σημαντικός για την επιτυχία της όλης διαδικασίας. Επιπλέον πρέπει να υπολογίσουμε και τη συνεργασία του τήγματος με το καλούπι που είναι άλλη μια πιθανή πηγή πρόκλησης ελαττωμάτων στα πλινθώματα. Κρίνεται λοιπόν απαραίτητος ο ποιοτικός έλεγχος στη γραμμή παραγωγής, ώστε να αποφευχθεί η διάθεση ελαττωματικών προϊόντων στην αγορά με συνεπαγόμενα αποτελέσματα την αύξηση του κόστους. Οι μέθοδοι ελέγχου είναι τριών κατηγοριών:

- Οπτικός έλεγχος: ο απλούστερος δυνατός που είναι ωστόσο πολύ σημαντικός. Με τον οπτικό έλεγχο είναι δυνατή η ανίχνευση ασυνεχειών, ρωγμών, στρεβλώσεων κτλ.
- Έλεγχος των διαστάσεων του χυτού, που γίνεται με τα κατάλληλα μετρητικά όργανα όπως κουμπάσο, διαβήτες, μικρόμετρα και παχύμετρα.
- Μεταλλουργικός έλεγχος: είναι ο πιο λεπτομερής τρόπος εξέτασης και πραγματοποιείται σε εργαστήριο. Είναι δυνατός ο προσδιορισμός της χημικής σύστασης και των μηχανικών ιδιοτήτων του χυτού.

Τα πιθανά ελαττώματα που εμφανίζονται κατά τη χύτευση είναι τα ακόλουθα:

- Στρέβλωση: η διαφορά του σχήματος μεταξύ προτύπου και χυτού λόγω κάμψης ή στρέψης, μέρους ή ολόκληρου του χυτού.
- Πόροι: είναι η συσσώρευση μικροσκοπικών διακενώσεων που οφείλονται στη συστολή του μετάλλου. Μπορούν να αναγνωριστούν από την χονδρόκοκη υφή του χυτού.
- Ρωγμές κατά τη στερεοποίηση: κατά την πήξη του μετάλλου και την επακόλουθη συστολή του δημιουργούνται ρωγμές είτε στην επιφάνεια είτε στο εσωτερικό του χυτού και συνήθως παρουσιάζονται οξειδωμένες.
- Ρωγμές κατά την απόψυξη: οφείλονται στην ανομοιόμορφη απόψυξη και την δημιουργία εσωτερικών τάσεων. Συνήθως δεν φέρουν σημάδια οξείδωσης αλλά εμφανίζουν χρώματα εξαιτίας της αλλαγής θερμοκρασίας.
- Κοιλώματα: είναι η δημιουργία κοιλοτήτων και κενών από τα αναπτυσσόμενα αέρια και ατμούς ή τη συστολή του υλικού.
- Διεισδύσεις μετάλλου: είναι η δημιουργία τραχέων και ακανόνιστων επιφανειών που οφείλονται στη διείσδυση του μετάλλου στο καλούπι.
- Διάφορες καταστροφές: όπως θραύσεις, εγκοπές, χαρακιές κτλ που προέρχονται από τη διαδικασία εξαγωγής του πλινθώματος από το καλούπι και από τον καθαρισμό του.

- Ανομοιογένεια της σύνθεσης: αναφορικά με τις προδιαγραφές που θέτουμε ή με κάποιους κανονισμούς, ενδέχεται η περιεκτικότητα των κραματικών στοιχείων να είναι διαφορετική.

Άλλες μορφές ανομοιογένειας είναι οι φυσαλίδες και τα μη μεταλλικά εγκλείσματα, που εισέρχονται στη γενικότερη έννοια του μικροδιαφορισμού, σαν χημική ανομοιογένεια. Οι φυσαλίδες προκαλούνται από την έκλυση αερίων κατά την πήξη και έχουν ως αποτέλεσμα τη συγκέντρωση μικροακαθαρσιών στην επιφάνεια ή στο εσωτερικό του πλινθώματος.

Τα μη μεταλλικά εγκλείσματα είναι τεμαχίδια διαφόρων συστάσεων, όπως: σκουριές, ακαθαρσίες και υλικό από τις καμίνους. Κατά την πήξη έχουμε συγκέντρωση των ουσιών αυτών, που ούσες ελαφρύτερες ανεβαίνουν στην περιοχή της διακένωσης. Εκτός από τον επηρεασμό των μηχανικών ιδιοτήτων διαταράσσεται η διαδικασία της στερεοποίησης αφού τα εγκλείσματα δημιουργούν πυρήνες κρυστάλλωσης.

**A)****B)**

Εικόνα 2 1:A) Πόροι στην επιφάνεια χυτού, λόγω συστολής, του μετάλλου κατά τη στερεοποίηση

Εικόνα 2 2:B) Πόροι λόγω της έκλυσης αερίων



C)

Εικόνα 2 3: C) Ρωγμή σε δακτυλίδι λόγω της ανάπτυξης οξειδίων στο μέτωπο ροής.



D)

Εικόνα 2 4: D) Έγκλεισμα σε χυτό αντικείμενο της χρυσοχοΐας

ΔΙΑΦΟΡΙΣΜΟΣ

Διαφορισμός καλείται το φαινόμενο της μη ομοιογενούς χημικής σύστασης σε ένα ρευστό μεταλλικό κράμα. Ο διαφορισμός διακρίνεται σε δύο τύπους: μικροδιαφορισμό και μακροδιαφορισμό [1]. Κατά το μικροδιαφορισμό, οι μεταβολές της χημικής σύστασης του ρευστού κράματος εμφανίζονται σε μικροσκοπική κλίμακα και κυρίως μέσα στα όρια των κόκκων. Ο μικροδιαφορισμός μπορεί να επηρεάσει έμμεσα τις μηχανικές ιδιότητες ενός κράματος.

Η εμφάνιση του μικροδιαφορισμού μπορεί να μειωθεί δραστικά με θερμική κατεργασία ομογενοποίησης. Γνωστό είναι ότι το φαινόμενο της διάχυσης είναι πολύ αργή διαδικασία στη στερεή φάση οπότε και η επίδρασή του στο μακροδιαφορισμό καθίσταται μειωμένη. Ο μακροδιαφορισμός αναφέρεται στη μακροσκοπική μεταβολή της χημικής σύστασης μέσα σε ένα ρευστό κράμα. Υπό συνθήκες κανονικού μακροδιαφορισμού, το τελευταίο μέρος του κράματος που στερεοποιήθηκε είναι και το πλουσιότερο στη ποσότητα του κραματικού στοιχείου. Υπό συνθήκες όμως αντίστροφου μακροδιαφορισμού, το τελευταίο μέρος του κράματος που στερεοποιήθηκε περιέχει και το μικρότερο ποσοστό του κραματικού στοιχείου. Τέσσερις παράγοντες ευνοούν την εμφάνιση του φαινομένου του μακροδιαφορισμού:

- συρρίκνωση λόγω στερεοποίησης και θερμικής συστολής,
- διαφορές στην πυκνότητα ανάμεσα στους κλάδους των δενδριτών,
- διαφορά στην πυκνότητα μεταξύ υγρού και στερεού υλικού και
- επαγωγικά ρεύματα που επιταχύνονται από τη διαφορά πυκνότητας μεταξύ υγρού και στερεού υλικού.

ΕΡΓΑΣΙΕΣ ΕΠΙΣΚΕΥΗΣ ΤΩΝ ΕΛΑΤΤΩΜΑΤΩΝ

Κατά την ανίχνευση κάποιου ελαττώματος είναι πιθανό να αποδειχθεί ότι το χυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί εάν υποστεί μια διαδικασία επισκευής. Έτσι επιτυγχάνεται μείωση του κόστους κατασκευής και απορρίπτονται λιγότερα τεμάχια. Οι μέθοδοι που εφαρμόζονται είναι οι παρακάτω [3]:

- Αναγόμωση με τηγμένο μέταλλο: είναι δυνατή η επισκευή διακενώσεων και ρωγμών μεγάλου μεγέθους αφού πρώτα καθαριστεί η περιοχή του σφάλματος. Μετά την απόχυση ακολουθεί ήπια απόψυξη.
- Αναγόμωση με ηλεκτρικό τόξο ή φλόγα: συνίσταται για επισκευή σημείων που δεν πρόκειται να επεξεργαστούν περαιτέρω και κάνει χρήση ηλεκτροδίων χυτοσιδήρου, χαλκού ή σιδήρου-νικελίου.
- Αναγόμωση με προθέρμανση: χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις εκτεταμένων ρωγμών και απαιτεί προθέρμανση του αντικειμένου στους 500-600°C για 45-60 min. Μετά ακολουθεί αναγόμωση με φλόγα οξυγόνου ασετυλίνης ή ηλεκτροκόλληση.
- Επιμετάλλωση με σκόνη μετάλλων: χρησιμοποιείται για μη σημαντικές επιφάνειες του χυτού, που δε θα δεχτούν μηχανουργική κατεργασία, για επιδιόρθωση μικρών κοιλοτήτων και πόρων.
- Επίχριση ή εμποτισμός με ειδικά υλικά: συνιστάται για περιπτώσεις που το αντικείμενο θα υποστεί υδραυλική πίεση κατά τη λειτουργία του.

Έπειτα από τις όποιες διορθωτικές εργασίες, είναι απαραίτητος ο επανέλεγχος του χυτού για να διαπιστωθεί η αντοχή, η στεγανότητα και η καλή εμφάνισή του.

2.1.1.3. Τεχνικές χύτευσης:

Μια κατηγοριοποίηση των τεχνικών χύτευσης μπορεί να γίνει *σύμφωνα με τον τρόπο τροφοδοσίας του τήγματος*, οπότε και διακρίνουμε τις εξής:

A) Η εκ των άνω ή κατευθείαν χύτευση, όπου η απόθεση πραγματοποιείται από πάνω και η στερεοποίηση ξεκινά από κάτω.

B) Η εν αναρροή ή πηγαία χύτευση, όπου η ελεύθερη επιφάνεια του τήγματος πραγματοποιεί ανοδική πορεία καθώς το τηγμένο μέταλλο διοχετεύεται από τη βάση του. [1]

Επίσης *ανάλογα με το ρυθμό απόχυσης του τήγματος* έχουμε

A) Τις συνεχείς και

B) Τις ασυνεχείς τεχνικές χύτευσης, οι οποίες πραγματοποιούνται σε μόνιμα (μεταλλικά) ή μη μόνιμα καλούπια (γύψινα, από άμμο κτλ). Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούν μόνιμο τύπο διακρίνονται σε αυτές με πίεση και σε αυτές με εφαρμογή φυγόκεντρου δύναμης, για την πλήρωση των κοιλοτήτων. [2]

Η εξέλιξη των τεχνικών χύτευσης επιτρέπει, ως κάποιο βαθμό, τη δημιουργία μορφών και επιφανειών, με σχετική άνεση, εξοικονόμηση υλικού και σε σύντομο χρονικό διάστημα. Σε σύγκριση με άλλες μεθόδους παραγωγής αντικειμένων ωστόσο, υστερεί σε περιπτώσεις απαίτησης υψηλής ακρίβειας, ποιότητας εναλλαξιμότητας, λειτουργικότητας και συναρμογής. Στις περισσότερες εφαρμογές αποτελεί μια πολύπλοκη και δαπανηρή εργασία και για αυτό το λόγο η επιλογή της κατάλληλης τεχνικής καθορίζεται σε συσχετισμό με τα παρακάτω [3], [4]:

1. Το χρησιμοποιούμενο υλικό
2. Τη μορφή και το μέγεθος του τεμαχίου
3. Την ακρίβεια και την ποιότητα
4. Τον αριθμό των προς παραγωγή αντικειμένων
5. Τις εγκαταστάσεις που διατίθενται

Για να είναι οικονομικά συμφέρουσα μια διαδικασία χύτευσης πρέπει αρχικά, το χυτό να είναι απλής γεωμετρίας, ώστε να μειωθούν τα έξοδα κατασκευής των μοντέλων, των πυρήνων και των καλουπιών. Έτσι η σχεδίαση και η διαμόρφωση του χυτού λαμβάνει

υπ' όψιν : τη χρησιμοποιούμενη τεχνική, τις συνθήκες χύτευσης και τα προβλήματα που προκαλούνται από αυτές (κακή ψύξη, πόροι, εσωτερικές τάσεις) καθώς και τη δυνατότητα εύκολης απομάκρυνσής του και καθαρισμού του.

Για την επίτευξη των παραπάνω απαιτήσεων και την ικανοποίηση όσο το δυνατόν περισσότερων εφαρμογών, έχουν αναπτυχθεί στις μέρες μας πολλές μέθοδοι χύτευσης που κάθε μια έχει διαφορετικά αποτελέσματα και διαφορετική φιλοσοφία παραγωγής.

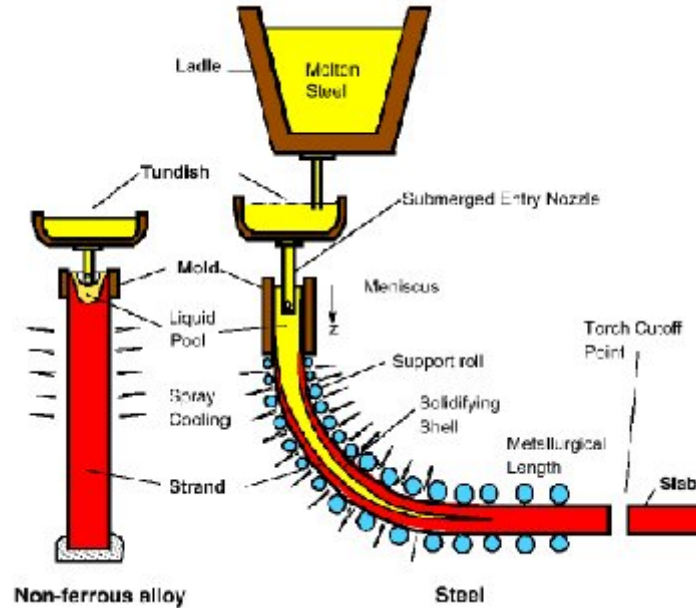
Παρακάτω ακολουθεί η περιγραφή των σημαντικότερων μεθόδων που βασίζονται στο είδος του καλουπιού (μόνιμο, μη μόνιμο , σύνθετο) [2], [3], [4], [7]:

ΣΥΝΕΧΗΣ ΧΥΤΕΥΣΗ

Η μέθοδος αυτή συνίσταται στο σχηματισμό πλινθώματος κατά συνεχή παραγωγή και ορίζεται ως εξής: «Πραγματοποιείται υπό τη συνεχή απόχυση τηγμένου μετάλλου σε διάτρητο ψυχόμενο καλούπι, όπου στερεοποιείται και εξάγεται με τη μορφή συνεχούς ράβδου».

Η διατομή της ράβδου έχει τη μορφή της διατομής του καλουπιού, η οποία είναι συνήθως κυκλική, τετραγωνική ή παραλληλόγραμμη. Η συνεχής χύτευση αναπτύχθηκε από το 1860 και αντικατέστησε τη χύτευση μπιγιετών (ασυνεχής – σε κομμάτια) βελτιώνοντας την ποιότητα των παραγόμενων προϊόντων στη σύσταση , στη δομή και την επιφάνεια. Σε μια εγκατάσταση συνεχούς απόχυσης (εικόνα 2.5) συναντάμε την ακόλουθη διάταξη:

- Τον κάδο απόχυσης
- Το δοχείο για την παροχή του τήγματος
- Το καλούπι συνεχούς έγχυσης το οποίο ψύχεται με νερό
- Το σύστημα απευθείας ψύξης του εξαγόμενου πλινθώματος
- Το σύστημα μηχανικής εξαγωγής του πλινθώματος (π.χ κύλινδροι)
- Το σύστημα κοπής της ράβδου (μηχανικά ή με φλόγα)
- Το σύστημα παραλαβής και απομάκρυνσης των τεμαχίων



Εικόνα 2 5: Διάταξη συνεχούς χύτευσης

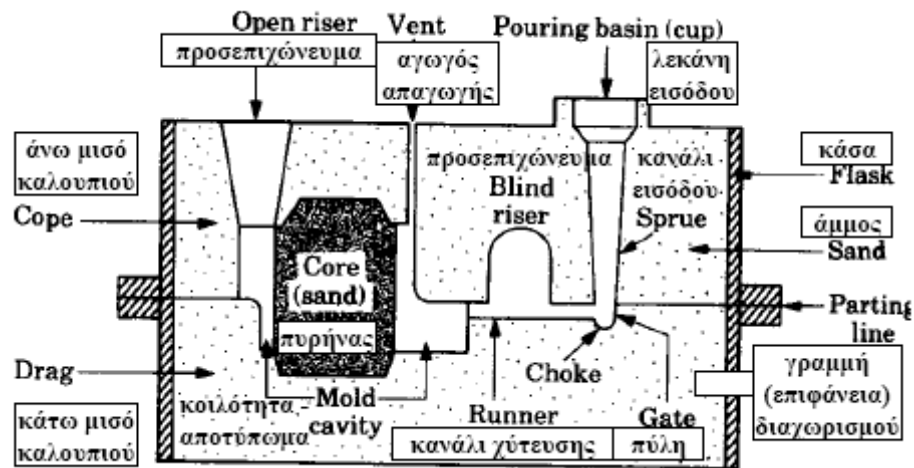
Συνήθως η χύτευση και η στερεοποίηση πραγματοποιούνται σε κατακόρυφο επίπεδο αλλά υπάρχουν και εφαρμογές της μεθόδου σε οριζόντιο επίπεδο. Τα πλεονεκτήματα της συνεχούς χύτευσης είναι η ταχύτατη στερεοποίηση, το μικρό κόστος και η απλότητα. Ωστόσο υστερεί στις επιλογές διαμόρφωσης των διατομών των χυτών και στη δύσκολη απομάκρυνση του μετάλλου από μεγάλους κάδους απόχυσης η οποία επιτυγχάνεται με αμμοβολή ή δονητικούς μηχανισμούς. Βρίσκει ευρεία εφαρμογή σε κράματα χάλυβα, χαλκού και αλουμινίου.

ΧΥΤΕΥΣΗ ΣΕ ΑΜΜΟ (ΤΥΠΩΜΑ ΜΕ ΤΟ ΧΕΡΙ)

Μια από τις πιο διαδεδομένες τεχνικές, είναι η χύτευση σε άμμο αφού επιτρέπει την παραγωγή τεμαχίων από οποιοδήποτε σχεδόν μέταλλο ανεξαρτήτως βάρους ή μεγέθους. Η διαδικασία της μεθόδου είναι αρκετά σύνθετη και απαρτίζεται από τα ακόλουθα στάδια:

- I. Η τύπωση: δηλαδή η δημιουργία κοιλότητας στο καλούπι με τη χρήση μονέλλου.
- II. Προσθήκη πυρήνων, αφού αφαιρεθεί το μονέλλο.
- III. Σχεδιασμό του συστήματος εισαγωγής του τηγμένου μετάλλου με τρόπο που να επιτρέπει τη διάχυση του σε όλα τα μέρη των κοιλοτήτων.

- IV. Απόχυση του τήγματος
- V. Αφαίρεση της άμμου, μετά τη στερεοποίηση με χρήση υδροβολής, αμμοβολής, χειροκίνητα κτλ.
- VI. Κοπή των προσεπιχωνευμάτων και των αγωγών με χρήση φλόγας, τροχού, πρέσας κτλ.
- VII. Καθαρισμός από τα υπόλοιπα άμμου και περαιτέρω επεξεργασία του τελικού χυτού.



Εικόνα 2 6: Καλούπι συνεχούς χύτευσης και τα κύρια τμήματα του

Παρακάτω ακολουθεί ανάλυση των παραπάνω βημάτων και του τρόπου που αυτά επηρεάζουν την ποιότητα των χυτών.

I. - II. Το τύπωμα: για την κατασκευή του απαιτούνται τα παρακάτω:

- Η άμμος
- Το μοντέλλο
- Το πλαίσιο

Η άμμος: για να έχουμε ικανοποιητικά αποτελέσματα χύτευσης η άμμος πρέπει να διαθέτει ορισμένες ιδιότητες όπως είναι

- Η ευπλαστότητα, ώστε να παίρνει εύκολα το επιθυμητό σχήμα

- Η συνεκτικότητα, ώστε οι κόκκοι να συνδέονται μηχανικά μεταξύ τους και όταν γίνεται η απομάκρυνση του προτύπου να μην υπάρχει κίνδυνος κατακρήμνισης των τοιχωμάτων. Επίσης το τύπωμα θα είναι ανθεκτικό στην υδροστατική πίεση που ασκεί το τηγμένο μέταλλο.
- Να είναι πυρίμαχη, για να μην υπάρχει κίνδυνος να λιώσει όταν έρθει σε επαφή με το ρευστό μέταλλο. Για την αύξηση του πυρίμαχου ενός είδους άμμου προσθέτουμε στη σύσταση τις αλκαλικές γαίες όπως Na_2O , K_2O , MgO κτλ.
- Να είναι πορώδης για την εύκολη απαγωγή των αερίων και των υδρατμών που δημιουργούνται κατά την απόψυξη και εμφανίζονται στο χυτό με τη μορφή πόρων ή διακενώσεων.

Η άμμος των χυτηρίων είναι μίγμα από πυριτική άμμο συν 5% αργιλική άμμο (συνδετική) συν 5% μαύρο φυτικό (σκόνη άνθρακα) συν 5% νερό. Η ανάμιξη των υλικών της άμμου πραγματοποιείται είτε χειροκίνητα, με φτυάρια, είτε με μηχανικούς αναμικτήρες. Για τη βελτίωση των χαρακτηριστικών της(πλαστικότητα, παραμορφωσιμότητα) χρησιμοποιούνται πρόσθετα όπως γραφίτης, άνθρακας και πριονίδι.

Γενικά υπάρχουν τρία είδη άμμου. Η πράσινη (green) που έχει προσθήκη πηλού και νερού, με κύριο χαρακτηριστικό της ότι παραμένει υγρή κατά την έγχυση του μετάλλου (το τύπωμα δηλαδή δε φουρνίζεται). Η διαδικασία χύτευσης με πράσινη άμμο είναι γρήγορη, οικονομική και ικανοποιητικής ακρίβειας, αλλά εξαιτίας του χαμηλού βαθμού απόψυξης που παρέχει, προκαλεί ελλιπή σκλήρυνση του χυτού ενώ επιπλέον δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μεγάλα τεμάχια.

Ένα άλλο είδος άμμου είναι η λεγόμενη ξηρή (skin dried) η οποία έχει ξηραθεί είτε με ατμοσφαιρικό αέρα είτε σε φούρνο. Η τεχνική αυτή ενδείκνυται για την παραγωγή μεγάλων και βαριών αντικειμένων αλλά με μικρότερη ακρίβεια. Επίσης είναι ακριβότερη από την υγρή άμμο και παρουσιάζει μεγαλύτερη πιθανότητα δημιουργίας ρωγματώσεων στο μέταλλο, λόγω μικρότερης διαπερατότητας. Τέλος υπάρχει και η δυνατότητα χρήσης υγρή άμμου στην οποία εφαρμόζουμε ένα ελαφρύ στέγνωμα με χρήση φλόγας.

Κατά την πλήρωση του πλαισίου με άμμο διακρίνουμε τρεις ζώνες. Η πρώτη είναι η άμμος επιφανείας (facing sand) η οποία είναι αυτή που έρχεται σε επαφή με το μέταλλο και δέχεται μεγάλες καταπονήσεις. Η δεύτερη είναι η άμμος υποστρώματος (backing sand) η οποία γεμίζει το υπόλοιπο του πλαισίου και υποστηρίζει την πρώτη ζώνη και η τρίτη είναι η άμμος πυρήνων που χρησιμοποιείται για την κατασκευή των πυρήνων και πρέπει να διαθέτει υψηλό πυρίμαχο και πορώδες.

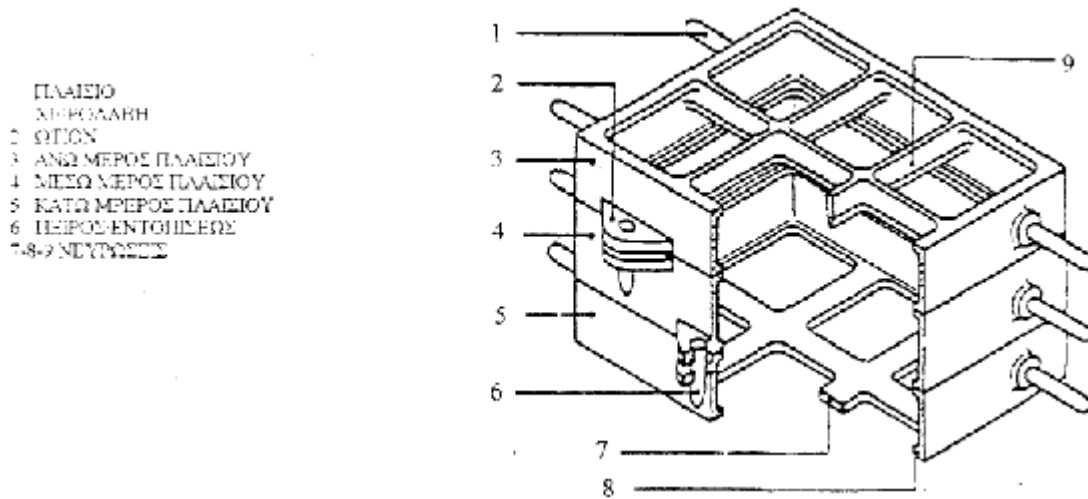
Το μοντέλλο: το τύπωμα σε άμμο απαιτεί την κατασκευή μοντέλλου το οποίο είναι συνήθως από ξύλο ή μέταλλο. Οι διαστάσεις του πρέπει να είναι τέτοιες ώστε να λαμβάνουν υπόψη τη συστολή του μετάλλου πλήρωσης κατά την απόψυξή του. Για τη διευκόλυνση της αποτύπωσης, το μοντέλλο μπορεί να αποτελείται και από άλλα αποσυναρμολογούμενα τμήματα ενώ όπου υπάρχουν κοιλώματα χρησιμοποιούνται κατάλληλες καρδιές και πυρήνες. Για την αποφυγή απορρόφησης υγρασίας από την άμμο ή από τον ατμοσφαιρικό αέρα τα μοντέλλα βάζονται με μογιά ή βερνίκι.

Οι πυρήνες: Για την αποτύπωση κοιλωμάτων, οπών , προεξοχών και εσωτερικών κοιλοτήτων είναι απαραίτητη η κατασκευή πυρήνων. Η διαδικασία κατασκευής γίνεται μηχανικά ή με το χέρι σε κουτιά πυρήνων ή τρεσσώ. Επίσης είναι συνήθης η ενίσχυσή τους με μεταλλικές βέργες ή δικτύωμα χυτοσιδήρου. Κατά την κατασκευή τους γίνεται πρόβλεψη για το άνοιγμα οπών εξαερισμού με τη βοήθεια βελονιού ή ξύλινης κωνικής ράβδου. Ανάλογα με το μέγεθος και το βάρος τους έχουμε τον ακόλουθο διαχωρισμό :

- Μέσου βάρους και βαρείς από χαλαζιακή άμμο, πυλό ή οργανικά πρόσθετα
- Ελαφρείς ή βαρείς από χαλαζιακή άμμο και οργανικά πρόσθετα
- Πολύ βαρείς από πυλό και τούβλα
- Μεταλλικούς με απλή μορφολογία

Το πλαίσιο: το πλαίσιο χονδρικά είναι ένα τετράγωνο κουτί χωρίς πυθμένα και καπάκι με κατάλληλη διαμόρφωση στις παράπλευρες επιφάνειες για τη συγκράτηση της άμμου. Κατασκευάζονται συνήθως από χυτοσίδηρο, χάλυβα, αλουμίνιο ή ξύλο και αποτελούνται από δυο τμήματα τουλάχιστον : το Άνω μέρος και το Κάτω μέρος. Για την ικανοποίηση πολλών περιπτώσεων μορφολογίας του καλουπιού είναι δυνατή η προσθήκη ενδιάμεσων

τρημάτων που τοποθετούνται σε εσωτερικές διάτρητες οπές και συγκρατούνται με πείρους.

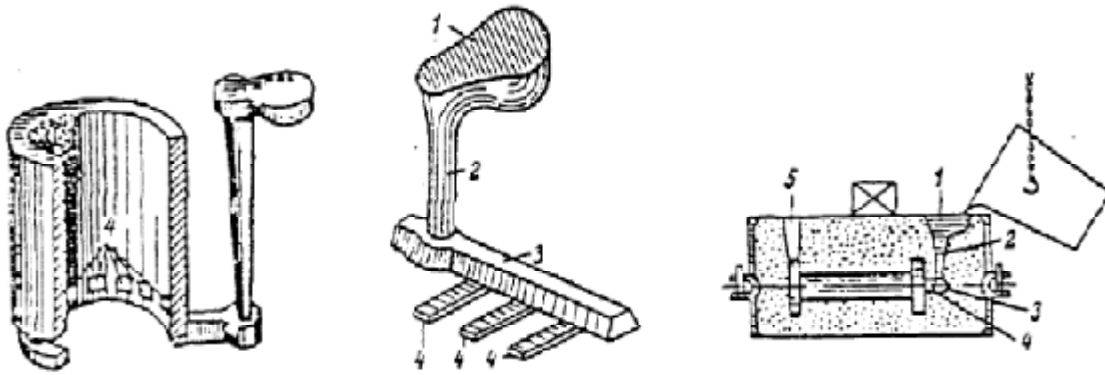


Εικόνα 2 7: Το πλαίσιο και τα τμήματα που το απαρτίζουν

III. Σύστημα αγωγών διόδου του ρευστού:

Για την πλήρωση του αποτυπώματος με τηγμένο μέταλλο είναι αναγκαία η σχεδίαση ενός συστήματος αγωγών. Τα τμήματα που περιλαμβάνει ένα τέτοιο «δίκτυο» και η λειτουργία τους είναι η εξής:

- Ο κάδος έγχυσης (pouring basin), ο οποίος παρέχει συνεχή και ομοιόμορφη τροφοδοσία μετάλλου χωρίς στροβιλισμούς στο καλούπι.
- Ο κατακόρυφος οχετός (downsprue), που τροφοδοτεί το χυτό με υγρό μέταλλο κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης και συστολής.
- Ο οριζόντιος αγωγός ροής (runner), που προλαμβάνει την εισαγωγή σκουριάς, άμμου και μη μεταλλικών εγκλεισμάτων
- Οι θυρίδες (in gates), που έχουν σκοπό την πρόληψη καταστροφής του χυτού από το ρεύμα μετάλλου.
- Τα προσεπιχωνεύματα: τα οποία επιτρέπουν την ομαλή στερεοποίηση του υλικού που περισσεύει στο καλούπι.
- Ένα σύστημα αγωγών του ρευστού μετάλλου, που μπορεί να είναι κατακόρυφο ή οριζόντιο κατά το οποίο το ρευστό εισέρχεται στο επίπεδο διαχωρισμού των άνω και κάτω τμημάτων του πλαισίου



Εικόνα 2 8: Σύστημα αγωγών τροφοδοσίας τήγματος. Διακρίνονται τα εξής: 1. κάδος έγχυσης, 2. κατακόρυφος οχετός, 3. οριζόντιος αγωγός ροής, 4. θυρίδες, 5. προσεπιχωνεύματα

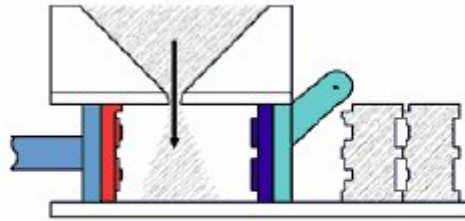
Η σχεδίαση των αγωγών καθορίζεται κυρίως από το εμβαδόν της διατομής των θυρίδων. Άλλοι παράγοντες που την επηρεάζουν είναι το πάχος των τοιχωμάτων, οι διαστάσεις και το σχήμα του χυτού. Εάν το πάχος των θυρίδων είναι ανεπαρκές τότε θα έχουμε επιμήκυνση του χρόνου έγχυσης και πιθανή πρόωρη στερεοποίηση πριν την πλήρωση του τύπου. Αντίθετα μεγάλες δίοδοι αποφεύγονται γιατί παρέχουν υπερεπαρκή ψύξη του χυτού χάνοντας έτσι τη ρευστότητα του, γεγονός που οδηγεί σε διακοπή της ροής και στη δημιουργία αναδιπλώσεων και ψυχρών εγκλεισμάτων.

ΧΥΤΕΥΣΗ ΣΕ ΑΜΜΟ (ΜΗΧΑΝΙΚΟ ΑΠΟΤΥΠΩΜΑ)

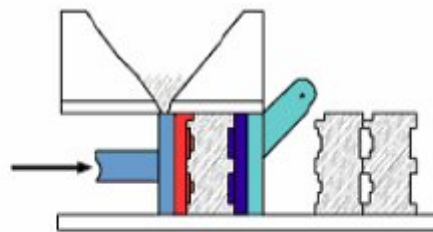
Στην προηγούμενη μέθοδο χύτευσης το παρασκευαζόμενο καλούπι είναι μιας χρήσεως. Απαιτείται δηλαδή η καταστροφή του προκειμένου να εξάγουμε το χυτό και επομένως όσα τεμάχια θέλουμε να κατασκευάσουμε, τόσα καλούπια πρέπει να διαθέτουμε. Για να αυξήσουμε το ρυθμό παραγωγής χρησιμοποιούμε τις μηχανές τύπωσης, οι οποίες περισφίγγουν με δόνηση ή με πίεση το πλαίσιο που περιέχει ήδη την άμμο. Το αποτύπωμα του τεμαχίου δίνεται από ένα πρότυπο που στηρίζεται πάνω σε μια πλάκα και είναι είτε μεταλλικό είτε γύψινο.

Με αυτήν την τεχνική επιτυγχάνουμε αναπαραγωγή όμοιων αντικειμένων με σημαντικά μεγαλύτερη ταχύτητα και ποιότητα. Επιπλέον απαλείφουμε τον παράγοντα ανθρώπινου λάθους στην όλη διαδικασία και έχουμε τη δυνατότητα ταυτόχρονης χύτευσης και

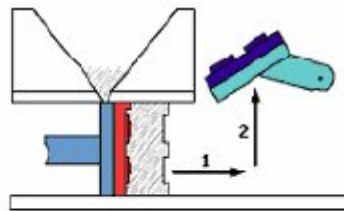
δημιουργίας του τύπου. Σημαντική είναι και η επιλογή αυτοματοποίησης της διαδικασίας, που παρουσιάζεται ακολούθως:



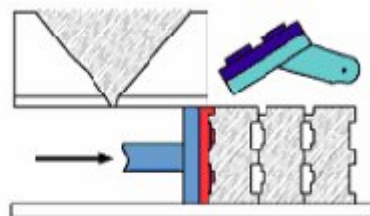
Βήμα 1: Η άμμος χύνεται στο θάλαμο σχηματισμού του τύπου από επάνω



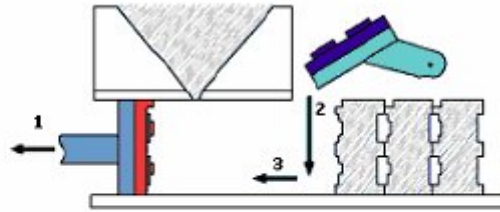
Βήμα 2: Το πιστόνι συμπιέζει την άμμο ώστε να πάρει τη μορφή του ενός μέρους του προτύπου core που είναι σχηματισμένο πάνω του



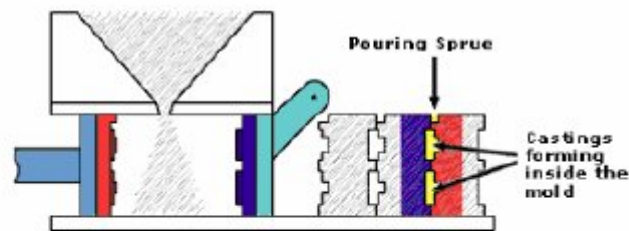
Βήμα 3: Ο βραχίονας, στον οποίο πάνω είναι αποτυπωμένο το δεύτερο τμήμα του τύπου drag, ανασηκώνεται επιτρέποντας στο καλούπι να εξέλθει από το θάλαμο.



Βήμα 4: Το πιστόνι ωθεί το νέο καλούπι έξω από το θάλαμο



Βήμα 5. Ο βραχίονας επιστρέφει στην αρχική του θέση και η διαδικασία επαναλαμβάνεται.

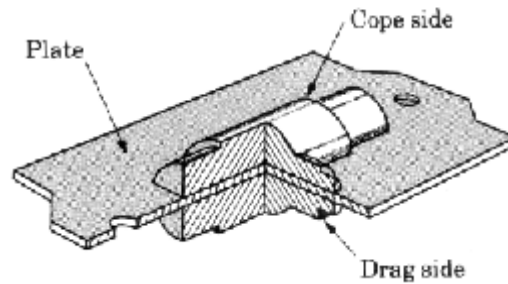


Βήμα 6. Μέσα στο θάλαμο παραγωγής των τύπων επαναλαμβάνεται η διαδικασία που έχουμε αναφέρει, ενώ πιο πέρα ο σίδηρος χύνεται στην κοιλότητα του τύπου που έχει ήδη διαμορφωθεί.

ΤΥΠΩΜΑ ΜΕ ΚΕΛΥΦΗ (SHELL MOLD CASTING)

Η διαδικασία κατασκευής τυπώματος με κελύφη, ονομάζεται διαφορετικά και χύτευση Croning. Αναπτύχθηκε κατά τη διάρκεια του δευτέρου Παγκοσμίου Πολέμου και εφαρμόστηκε στις Η.Π.Α από το 1947. Αυτή η μέθοδος επιτρέπει την γρήγορη κατασκευή λεπτότοιχων και ανθεκτικών καλουπιών (κελύφη) με την προσθήκη θερμοσκληρυνόμενης ρητίνης στο μίγμα της άμμου. Επιτυγχάνεται δηλαδή η στερεοποίηση ενός λεπτού στρώματος άμμου, μερικών χιλιοστών, το οποίο αγκαλιάζει το πρότυπο.

μοδέλο τύπου πλάκας



Εικόνα 2 9: Τύπωμα κελύφους

Τα βήματα που ακολουθούνται στη χύτευση Croning είναι τα παρακάτω:

- Θερμαίνουμε την πλάκα-πρότυπο στους 150-300 °C αφού πρώτα την ψεκάσουμε με γαλάκτωμα που εμποδίζει την προσκόλληση του κελύφους.
- Απλώνουμε στη μια πλευρά του προτύπου ένα λεπτό στρώμα άμμου με πρόσμιξη ρητίνης σε ποσοστό 2,5-4,0 %
- Ακολουθεί η θέρμανση σε φούρνο για τη σκλήρυνση του κελύφους και τέλος
- Όταν σχηματιστεί επαρκές πάχος καλουπιού αυτό αποκολλάται από το πρότυπο και επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία και για το άλλο μισό του.

Στη συνέχεια συναρμολογούνται τα δυο μισά τμήματα και τοποθετούνται όρθια μέσα σε ορθογώνια πλαίσια. Τα δημιουργούμενα κενά γεμίζονται με άμμο ή σφαιρίδια χάλυβα και κατόπιν γίνεται η πλήρωση του καλουπιού με τηγμένο μέταλλο. Οι πλάκες-πρότυπα φτιάχνονται συνήθως από ορείχαλκο, χάλυβα, αλουμίνιο ή χυτοσίδηρο. Με τη μέθοδο αυτή μπορούμε να παρασκευάσουμε χυτά από 50 gr έως 100 kg. Τα πλεονεκτήματα που παρέχει είναι:

- Επίτευξη γεωμετρικής ακρίβειας και διαστάσεων μεγαλύτερη από αυτήν του τυπώματος με κοινή άμμο.
- Χύτευση ακέραιων τεμαχίων με λεία επιφάνεια και επομένως απλοποίηση της τελικής κατεργασίας
- Μεγάλη ταχύτητα παρασκευής και οικονομία υλικού
- Δυνατότητα χύτευσης όλων των κραμάτων χυτηρίου, σιδηρούχων ή μη.

Μειονέκτημα της μεθόδου είναι το σχετικά αυξημένο κόστος και ειδικά αυτό της ρητίνης

ΧΥΤΕΥΣΗ ΣΕ ΚΑΛΟΥΠΙ ΓΥΨΟΥ

Το συγκεκριμένο είδος χύτευσης εμφανίζει πολλά κοινά χαρακτηριστικά με τη μέθοδο Croning με τη διαφορά ότι το πρότυπο αλείφεται με πάστα γύψου η οποία στερεοποιείται σχετικά γρήγορα. Το υλικό του μοντέλλου δεν μπορεί να είναι από ξύλο αφού το πορώδες του επηρεάζει την τελική επιφάνεια του γύψου και κατ'επέκταση του χυτού. Πλεονέκτημα της μεθόδου είναι το πολύ μικρό κόστος και η ομοιόμορφη μικροδομή του χυτού που επιτυγχάνεται με την αργή απόψυξη εξαιτίας της χαμηλής διαπερατότητας του γύψου. Μειονέκτημα ωστόσο αποτελεί η αργή ξήρανση του, η οποία ολοκληρώνεται περίπου σε 16 ώρες σε θερμοκρασία φούρνου 120°C. Επιπλέον δε είναι δυνατή η χύτευση σιδηρούχων κραμάτων λόγω της ψαθυροποίησης του γύψου σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 1200 °C.

ΧΥΤΕΥΣΗ ΜΕ ΚΕΡΑΜΙΚΟ ΚΑΛΟΥΠΙ

Η διαδικασία της μεθόδου είναι όμοια με αυτή του γύψινου καλουπιού με πλεονέκτημα την αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες και επομένως τη δυνατότητα χύτευσης σιδηρούχων κραμάτων. Η κεραμική πάστα αποτελείται από :

- ZrSiO_4
- Al_2O_3 (αλούμινα)
- Si (πυρίτιο) με συνδετικό υλικό

Η ποιότητα του χυτού είναι πολύ καλή, ωστόσο το κόστος του αρκετά μεγάλο.

ΧΥΤΕΥΣΗ ΣΕ ΜΕΤΑΛΛΙΚΑ ΚΑΛΟΥΠΙΑ (ΜΟΝΙΜΟΣ ΤΥΠΟΣ)

Η ανάγκη για κατασκευή όμοιων αντικειμένων σε σχήμα και διαστάσεις, οδήγησε στην κατασκευή μεταλλικών καλουπιών. Έτσι επιτυγχάνεται μεγάλη αύξηση της παραγωγικότητας, βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων των χυτών και οικονομία, αφού ο αριθμός των ελαττωματικών προϊόντων μειώνεται δραστικά. Σε αντίθεση με τα καλούπια άμμου, τα μεταλλικά είναι λειτουργικά ακόμα και μετά από μερικές εκατοντάδες χιλιάδες χυτά χαμηλού σημείου τήξης (αλουμίνιο, χαλκός). Είναι όμως αδύνατη η

χύτευση κραμάτων υψηλού σημείου τήξης. Ο τρόπος έγχυσης του τηγμένου μετάλλου στον τύπο μπορεί να γίνει με δύο τρόπους:

- Υπό ατμοσφαιρική πίεση, όπου το ρευστό εισέρχεται απευθείας στο καλούπι που ονομάζεται όστρακο ή κοχύλι και
- Υπό πίεση, όπου το τήγμα εγχύεται από μηχανές με μεγάλη πίεση.

Στην πρώτη περίπτωση, το καλούπι που αποτελείται από δυο τουλάχιστον τμήματα, κλείνεται και το μέταλλο εγχύεται υπό την επίδραση της βαρύτητας. Το τύπωμα περιλαμβάνει, εκτός του τελικού χυτού και όλες τις διόδους, αγωγούς ή προσεπιχωνεύματα που απαιτούνται για τη σωστή πλήρωση του. Αφού στερεοποιηθεί το ρευστό, αποσυναρμολογούμε το καλούπι και παραλαμβάνουμε το τεμάχιο. Τα μέρη από τα οποία αποτελείται το καλούπι είναι το κύριο σώμα που κατασκευάζεται από φαιό χυτοσίδηρο για να μην παραμορφώνεται στις υψηλές θερμοκρασίες και οι πυρήνες που είναι απαραίτητοι για την αποτύπωση κοιλωμάτων. Πριν την απόχυση του υλικού, ο τύπος θερμαίνεται στους 350 °C και κατά τη διάρκεια της έγχυσης συνεχίζεται η θέρμανση του με χρήση φλόγας αερίου.

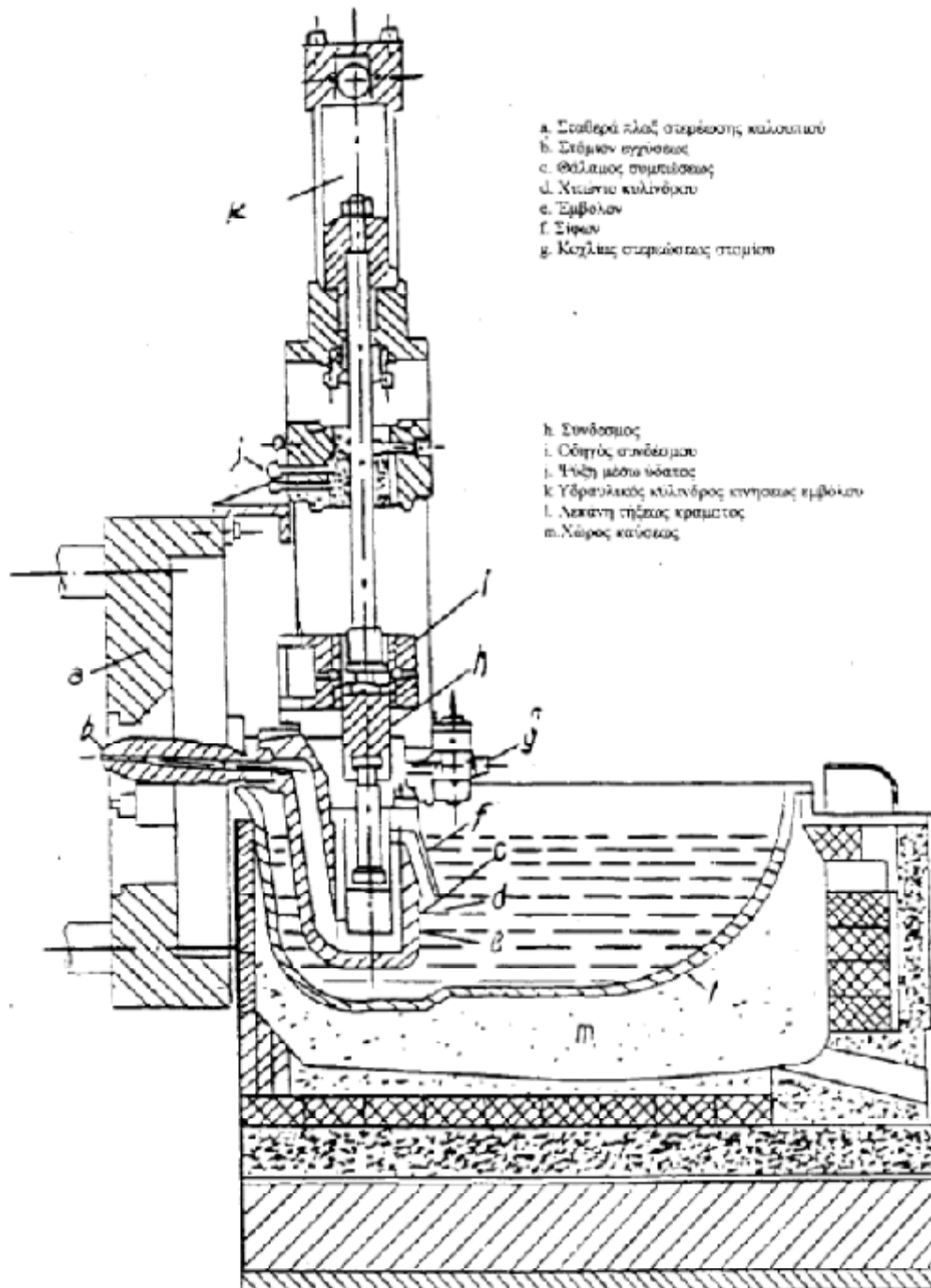
Στην περίπτωση μηχανικής έγχυσης υπό πίεση, η στερεοποίηση πραγματοποιείται με ψύξη του καλουπιού μέσω κυκλοφορίας νερού, μειώνοντας σημαντικά το χρόνο που απαιτείται και επιτρέπεται η απευθείας χρήση των χυτών χωρίς επιπλέον επεξεργασία. Οι μηχανές έγχυσης υπό πίεση είναι δυο τύπων:

- Θερμού θαλάμου, με δυνατότητα χρήσης κραμάτων ψευδαργύρου με πίεση 70-120 kp/cm²
- Ψυχρού θαλάμου, όπου εγχέονται κράματα ορείχαλκου ή αλουμινίου υπό πίεση 400-1200 kp/cm²

Στις περιπτώσεις μηχανών ψυχρού θαλάμου το καλούπι αποτελείται από δυο μπλοκ, το ένα εκ των οποίων τοποθετείται από την πλευρά της τροφοδότησης του μετάλλου και έχει μικρότερο αποτύπωμα από ότι το άλλο που τοποθετείται επί του κινητού φορείου της μηχανής.

Σε αυτό βρίσκονται επίσης και οι μηχανισμοί ξεκαλουπώματος του χυτού, όπως εκτοξευτές πεπιεσμένου αέρα, κινητοί δακτύλιοι κτλ. Το υλικό κατασκευής τους είναι

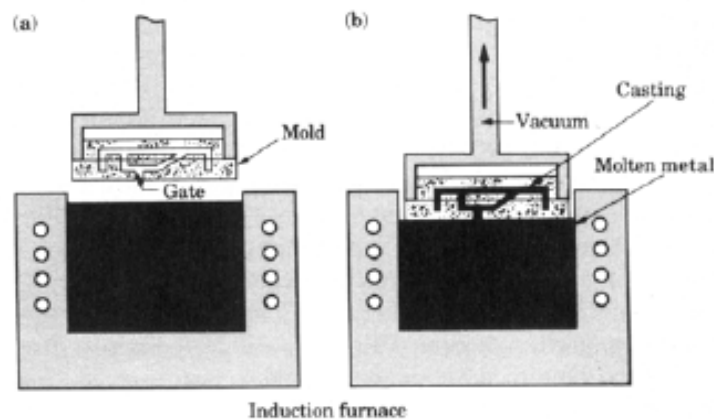
συνήθως κατεργασμένος χάλυβας για αντοχή σε θερμικά φορτία.



Εικόνα 2 10: Μηχανή χύτευσης υπό πίεση, ψυχρού θαλάμου

XYTEYΣH EN KENΩ (VACUUM CASTING)

Η χύτευση σε κενό απαιτεί τη χρήση μεταλλικής μήτρας για τη διαμόρφωση του καλουπιού, το οποίο αποτελείται από μίγμα ψιλής άμμου και ουρεθάνης. Ο τύπος συγκρατείται από ρομποτικό βραχίονα που τον κατευθύνει πάνω από τον κάδο όπου βρίσκεται το τηγμένο μέταλλο και το βυθίζει μερικώς δημιουργώντας και συνθήκες υποπίεσης στην άνω πλευρά του. Έτσι από τη διαφορά πίεσης καλουπιού και κάδου, αναρροφάται το μέταλλο και γεμίζει τις κοιλότητες. Για να εξασφαλιστεί επαρκής ρευστότητα του τήγματος, βρίσκεται συνεχώς, περίπου 50°C πάνω από τη θερμοκρασία liquidus του μετάλλου. Η διαδικασία στερεοποίησης ξεκινά μόλις το καλούπι απομακρυνθεί από τον κάδο και ασφαλιστεί. Η μέθοδος παρέχει πολύ καλή ποιότητα σε λεπτότοιχα κυρίως αντικείμενα με σύνθετη γεωμετρία. Η δυνατότητα παραγωγής είναι ευρεία περιλαμβάνοντας τεμάχια με πάχος 0,5mm μέχρι ογκώδη δεκάδων κιλών. Τέλος είναι δυνατή η αυτοματοποίηση της διαδικασίας αυξάνοντας την παραγωγικότητα και μειώνοντας το κόστος χύτευσης.



Εικόνα 2 11: Διάταξη χύτευσης εν κενώ

ΧΥΤΕΥΣΗ ΔΙΟΓΚΟΥΜΕΝΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ/ΧΑΜΕΝΟΥ ΑΦΡΩΔΟΥΣ ΥΛΙΚΟΥ (EXPANDABLE PATTERN / LOST FOAM CASTING)

Αυτό το είδος χύτευσης χρησιμοποιεί μοντέλλο από πολυστυρένιο και καλούπι άμμου. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα της είναι ότι δεν απαιτείται η εξαγωγή του προτύπου από το καλούπι πριν την απόχυση, αφού αυτό θα εξατμιστεί μόλις το τηγμένο μέταλλο έρθει σε επαφή μαζί του. Εφαρμόζεται κυρίως σε αυτοματοποιημένες γραμμές χύτευσης σιδηρούχων ή μη κραμάτων και τα βήματα που ακολουθούνται είναι τα ακόλουθα:

- ο Το πολυστυρένιο αλείφεται με διαδοχικά στρώματα πυρίμαχης πάστας και μόλις ξηρανθεί τοποθετείται σε πλαίσιο γεμισμένο με ψιλή άμμο για να το στηρίζει.
- ο Πραγματοποιείται η απόχυση του τήγματος χωρίς να απομακρύνουμε το πρότυπο, το οποίο εξατμίζεται από τη θερμότητα. Τα προϊόντα της καύσης απορροφούνται από το καλούπι.

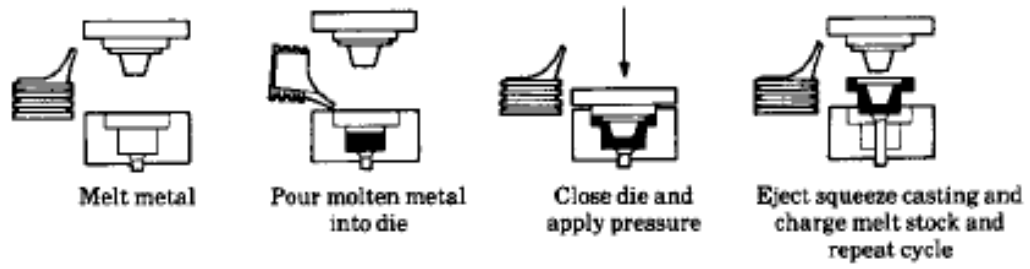
Ο ρυθμός αποπολυμερισμού του πολυστυρενίου εξαρτάται από τον ρυθμό έγχυσης και ρυθμίζεται με τον κατάλληλο σχεδιασμό των αγωγών και των κοιλοτήτων. Εξαιτίας της απορρόφησης ενέργειας από το πολυμερές επιτυγχάνεται ταχεία ψύξη του χυτού και επομένως λεπτόκοκη μικροδομή. Τα βασικά πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι τα εξής:

- ο Απουσία διαχωριστικής γραμμής από το χυτό καθώς και των πυρήνων, προσεπιχωνευμάτων κτλ.
- ο Χαμηλό κόστος πολυστυρενίου
- ο Ικανοποιητική ακρίβεια και λεπτές διατομές
- ο Ελάχιστες εργασίες καθαρισμού των πλινθωμάτων

Βρίσκει εφαρμογή κυρίως σε γραμμές παραγωγής εξαρτημάτων αυτοκινητοβιομηχανίας όπως εμβόλων, μπλοκ κινητήρων κτλ.

SQUEEZE CASTING

Η συγκεκριμένη τεχνική αναπτύχθηκε τη δεκαετία του 1960 και αποτελεί το συνδυασμό χύτευσης και σφυρηλάτησης. Χρησιμοποιείται πρέσα για την πίεση του τήγματος στο καλούπι, διευκολύνοντας έτσι τη μεταφορά θερμότητας στη διεπιφάνεια μετάλλου και καλουπιού. Τα παραγόμενα χυτά διαθέτουν πολύ καλή δομή με μικρές διακενώσεις. Η ασκούμενη πίεση είναι μικρότερη από αυτή της χύτευσης υπό πίεση αλλά μικρότερη από αυτήν της σφυρηλάτησης.



Εικόνα 2 12 : Τα βήματα της μεθόδου squeeze casting

2.1.1.3. Σύγκριση των μεθόδων χύτευσης

Η διαδικασία της χύτευσης ως μέσο παραγωγής αντικειμένων, συνιστάται σε πολλές περιπτώσεις αφού επιτρέπει την κατασκευή τεμαχίων με περίπλοκη μορφή, λεπτών τοιχωμάτων και μεγάλου εύρους διαστάσεων και βάρους. Συνήθως επιτυγχάνεται η επεξεργασία του μετάλλου με τον πλέον οικονομικό τρόπο, επομένως το κόστος παραγωγής αλλά και πώλησης είναι χαμηλό. Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου χύτευσης εξαρτάται από ορισμένα κριτήρια που παρουσιάζονται παρακάτω:

- Το σχήμα του αντικειμένου (μέγεθος, διατομή, γεωμετρία)
- Το χρησιμοποιούμενο υλικό
- Τον αριθμό των τεμαχίων που θέλουμε να κατασκευάσουμε
- Την απαιτούμενη ακρίβεια
- Το κόστος παραγωγής
- Τις διαθέσιμες εγκαταστάσεις και τα μέσα που διαθέτουμε

Ακολουθεί ένας πίνακας με τα πλεονεκτήματα και τους περιορισμούς των κυριότερων μεθόδων χύτευσης.

ΜΕΘΟΔΟΣ	ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ	ΟΡΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ
Χύτευση σε άμμο (sand casting)	Χύτευση σχεδόν οποιοδήποτε μέταλλο, χωρίς περιορισμό στο μέγεθος, το σχήμα και το βάρος	Απαιτείται τελικό φινιρίσμα, το χυτό έχει τραχιά επιφάνεια και έχουμε σημαντικές ανοχές στις διαστάσεις
Χύτευση σε τύπο με κέλυφος άμμου (shell mold casting)	Καλή ακρίβεια στις διαστάσεις και λεία εξωτερική επιφάνεια. Δυνατότητα μαζικής παραγωγής	Περιορισμένα όρια μεγέθους, τύποι που κοστίζουν ακριβά και απαίτηση ακριβούς εξοπλισμού.
Χύτευση σε τύπο από αφρώδες πολυμερές	Τα περισσότερα μέταλλα χυτεύονται με αυτή τη μέθοδο χωρίς περιορισμό στο μέγεθος. Σύνθετες μορφές	Οι τύποι έχουν χαμηλή αντοχή και υψηλό κόστος για μικρό μέγεθος παραγωγής

Χύτευση σε τύπο από πολυμερές υλικό(plaster mold)	Δημιουργία αντικειμένων με πολύπλοκο σχήμα και με καλή ακρίβεια διαστάσεων. Λεία εξωτερική επιφάνεια	Περιορισμένη εφαρμογή σε μη σιδηρούχα μέταλλα, περιορισμό στις διαστάσεις του πλινθώματος και το μέγεθος της παραγωγής. Η κατασκευή του τύπου είναι χρονοβόρα. Περιορισμένο μέγεθος πλινθώματος
Χύτευση σε κεραμικό τύπο (ceramic mold)	Πολύπλοκα σχήματα, μεγάλη ακρίβεια στις διαστάσεις και καλή ιαλική εξωτερική επιφάνεια	
Χύτευση ακριβείας (investment casting)	Πολύπλοκα σχήματα, εξαιρετική ποιότητα εξωτερικής επιφάνειας και ακρίβεια διαστάσεων. Είναι σχεδόν δυνατή η χύτευση οποιοδήποτε μετάλλου.	Περιορισμοί στο μέγεθος της παραγωγής. Ακριβή καλούπια-πλινθώματα και εργατικά.
Χύτευση σε μεταλλικό τύπο (permanent mold)	Καλή εξωτερική επιφάνεια και ακρίβεια στις διαστάσεις. Χαμηλό πορώδες	Υψηλό κόστος κατασκευής τύπου, περιορισμοί στο σχήμα και την πολυπλοκότητα. Δεν είναι κατάλληλη μέθοδος για χύτευση μετάλλων με υψηλό σημείο λήξης.
Χύτευση με πίεση (Die)	Εξαιρετική ακρίβεια στις διαστάσεις και στην ποιότητα της εξωτερικής επιφάνειας. Δυνατότητα μαζικής παραγωγής	Ακριβή η κατασκευή του τύπου, περιορισμένο μέγεθος. Μεγάλη διάρκεια παραγωγής.
Φυγόκεντρι χύτευση (centrifugal casting)	Μεγάλα κυλινδρικά κομμάτια με υψηλή ποιότητα	Ο εξοαιλομός είναι ακριβός. Το σχήμα των πλινθωμάτων είναι περιορισμένο

SAND MOLDS			METAL MOLDS		SPECIAL MOLDS		
	Green Sand Mold	Dry Sand Mold	Shell Mold	Permanent Mold	Die Mold	Investment Mold	Plaster Mold
Primary Mold Materials	Sand + Clay Binder + Moisture	Sand - Oil Binder - Oven	Sand + Resin Binder + Oven	Normally Steel	Hardened Steel	Silica Sand + Special Binder + Air & Oven	Gypsum Water

		Baked	Cure			Cure	
Metals Cast	Most Metals	Most Metals	Most Metals	Aluminum Brass Bronze Some Iron	Alloys of Aluminum Zinc Magnesium	Special Alloys	Aluminum Brass Bronze Zinc
Surface Finish	Rough	Rough	Smooth	Smooth	Very Smooth	Very Smooth	Very Smooth
Accuracy of Casting	Not Very Accurate	Not Very Accurate	Fairly Accurate	Fairly Accurate	Very Accurate	Very Accurate	Fairly Accurate
Normal Weight	Less than 1 Lb to Several Tons	Less than 1 Lb to Several Tons	1/2 Lb to 30 Lbs	Less than 1 Lb to 15 Lbs	Less than 1 Lb to 20 Lbs	Less than 1 Ounce to 10 Lbs	Less than 1 Lb to 20 Lbs
Cost of Mold or Die	Low	Low	Medium	High	High	High	Medium

2.1.2. Χύτευση με τη Μέθοδο Χαμένου Κεριού (Lost Wax/ Investment Casting)

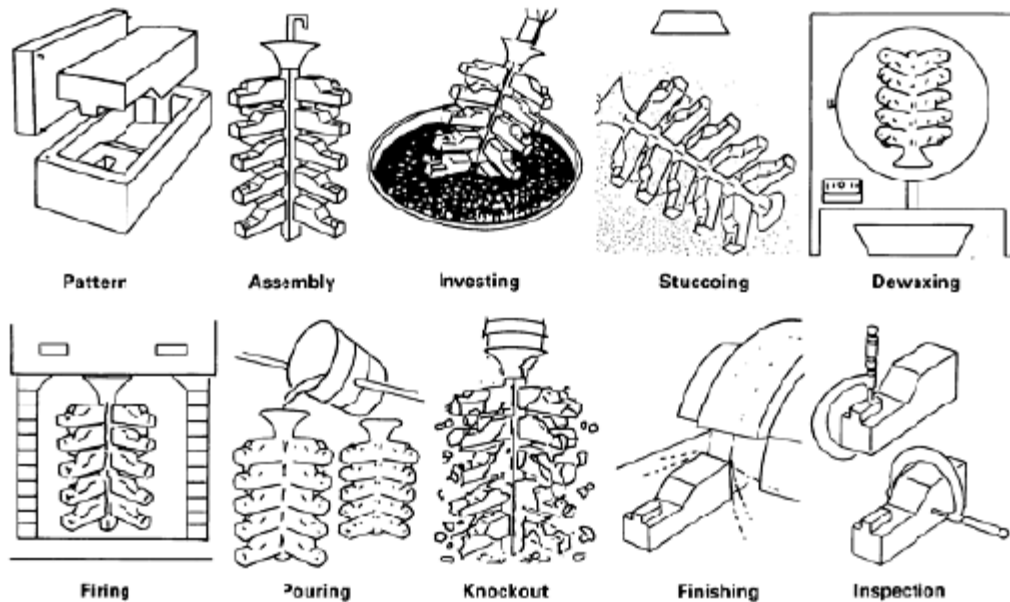
Η χύτευση χαμένου κεριού ανακαλύφθηκε τον 6^ο π.Χ αιώνα και χρησιμοποιήθηκε κυρίως για την κατασκευή κοσμημάτων. Στις μέρες μας απαντάται κατά κόρον σε καλλιτεχνικά χυτήρια, σε εργαστήρια οδοντικών προσθέτων και σε περιπτώσεις σύνθετων στρατιωτικών εφαρμογών και στην κατασκευή πτερυγίων για στροβίλους. Η σημαντικότερη διαφορά με όλες τις προαναφερθείσες τεχνικές είναι το γεγονός ότι το καλούπι αποτελείται από ένα μόνο κομμάτι, επιτρέποντας έτσι τη χύτευση τεμαχίων με ιδιαίτερα μεγάλη ακρίβεια που φτάνει τα 0,07mm. Η εκτέλεση του τυπώματος επιτυγχάνεται με δυο τρόπους:

A. Με δημιουργία κεραμικού κελύφους (ceramic shell process)

B. Με στέρεο καλούπι (solid mold investment casting)

Η διαδικασία και στις δυο περιπτώσεις είναι παρόμοια και περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα [4], [7]:

- Αρχικά κατασκευάζουμε ένα κύριο πρότυπο, συνήθως από μπρούντζο ή ορείχαλκο τον οποίο μπορούμε να επεξεργαστούμε εύκολα λόγω της μικρής σκληρότητας του. Η διαστασιολόγηση του πρέπει να λαμβάνει υπ'όψιν τη συστολή του κεριού και του μετάλλου.
- Εγχέουμε κερί στο καλούπι και παράγουμε τον απαιτούμενο αριθμό κέρινων ομοιωμάτων.
- Με το επεξεργασμένο πρότυπο κατασκευάζουμε ένα αποσυναρμολογούμενο καλούπι – κέλυφος
- Κατασκευάζουμε τους εγχυτήρες μετάλλου, τα αυλάκια και τους αγωγούς που συνδέουν τους εγχυτήρες με το πρότυπο.
- Τα συναρμολογούμε όλα μαζί σε ομάδες σχηματίζοντας έτσι το δέντρο χύτευσης.



Εικόνα 2 13: Η κατασκευή του μοντέλου, η συναρμολόγηση του δέντρου, η χύτευση και η τελική παραλαβή των τεμαχίων

Υλικά προτύπων [4], [6]:

Για την κατασκευή προτύπων χρησιμοποιούνται κυρίως δυο υλικά. Διάφορα είδη κεριών και πλαστικό (πολυστυρένιο).

Τα κεριά είναι το πιο συνηθισμένο υλικό για μια χύτευση ακριβείας που όμως σπανίως χρησιμοποιείται μόνο του. Τις περισσότερες φορές εμπλουτίζεται με άλλα υλικά για να βελτιωθούν οι ιδιότητές τους, όπως πλαστικό, ρητίνες, αντιοξειδωτικά και χρωστικές ουσίες. Τα πιο διαδομένα είδη κεριού είναι οι παραφίνες και τα μικροκρυσταλλικά κεριά εξαιτίας των συνολικά καλών χαρακτηριστικών που διαθέτουν, όπως το χαμηλό κόστος, τη μεγάλη διαθεσιμότητα, την καλή λιπαντικότητά τους και το χαμηλό ιξώδες. Ωστόσο εμφανίζουν δυο σημαντικά μειονεκτήματα: την ψαθυρότητα και το μεγάλο ποσοστό συρρίκνωσης όταν στερεοποιούνται. Υπάρχουν και άλλα είδη κεριών, φυσικά ή τεχνητά που ανάλογα με τις ιδιότητές τους καλύπτουν ευρύ φάσμα εφαρμογών. Τέτοια είναι ο οζοκηρίτης και το μελισσοκέρι. Η σύσταση των κεριών φαίνεται στον Πίνακα 2:

Πίνακας 2: Σύσταση χρησιμοποιούμενου κεριού για την κατασκευή προτύπου

Ingredients	Composition (%)
Waxes (usually more than one)	30-70
Resins (one or two)	20-60
Plastic (one)	0-20
Other	0-5

Η επιλογή του κατάλληλου είδους κεριού γίνεται βάσει των ακόλουθων κριτηρίων:

- Ευκολία ψεκασμού: από αυτήν εξαρτάται η δυνατότητα αναπαραγωγής, με ακρίβεια, της γεωμετρίας του προτύπου.
- Εύκολη απομάκρυνση, επεξεργασία και εφαρμογή: τα χαρακτηριστικά αυτά οφείλονται στην λιπαντικότητα στην αντοχή και την εύκολη τήξη του κεριού.
- Διαστασιολογική ακρίβεια: για αυτό επιθυμούμε όσο το δυνατόν μικρότερο ποσοστό συρρίκνωσης και πορώδους.
- Εύκολη αποκέρωση.
- Χαμηλό κόστος, δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης και μικρή τοξικότητα.

Το πιο διαδεδομένο είδος πλαστικού που χρησιμοποιείται στην κατασκευή ομοιωμάτων είναι το πολυστυρένιο που πλεονεκτεί σε σχέση με το κερί στα εξής: στη δυνατότητα αυτοματοποίησης της διαδικασίας προτυποποίησης σε διατάξεις με μεγάλο ρυθμό παραγωγής και στη μεγαλύτερη αντοχή του σε σημεία που η διατομή λεπταίνει πολύ. Λόγω αυτών των χαρακτηριστικών του είναι εφικτή η αποθήκευση των προτύπων για μεγάλο χρονικό διάστημα πριν τη χρήση τους, χωρίς να χάνουν τις ιδιότητές τους. Παρόλα αυτά το πεδίο εφαρμογής τους περιορίζεται εξαιτίας των μειονεκτημάτων τους :

- Η πρόκληση ρωγμών στο καλούπι, κατά την απομάκρυνσή τους κυρίως στα κεραμικά κελύφη.
- Ακριβός εξοπλισμός επεξεργασίας και έγχυσης τους.

Σήμερα πλαστικά πρότυπα χρησιμοποιούνται στη χύτευση αεροπτερυγίων αφού η προτυποποίηση με κερί θα ήταν αδύνατη από την ψαθυροποίηση τους και την πρόκληση ρωγμών, καθώς και σε περιπτώσεις μεγάλου αριθμού μικρών τεμαχίων. Εκτός του πολυστυρενίου συναντάμε πρότυπα από νάιλον, πολυαιθυλένιο και αιθυλική κυτταρίνη. Τέλος έχουν αναπτυχθεί και άλλα υλικά για προτυποποίηση τα οποία είναι υδατοδιαλυτά και περιορίζουν την πιθανότητα καταστροφής του καλουπιού κατά την απομάκρυνσή τους. Τέτοια είναι διάφορα μίγματα αλάτων, ναφθαλίνης και αφροί πολυστυρενίου.

Προτυποποίηση

Τα πρότυπα για μια χύτευση ακριβείας κατασκευάζονται με την έγχυση του κεριού ή του πλαστικού σε μεταλλικά καλούπια επιθυμητού σχήματος. Σε περιπτώσεις μικρών ποσοτήτων μπορούν να κατασκευαστούν και με κατεργασία του υλικού.

Όταν το ομοίωμα είναι από κερί η έγχυση γίνεται σε διαιρετά καλούπια, υπό χαμηλή θερμοκρασία και πίεση, με τη βοήθεια ειδικού εξοπλισμού. Ανάλογα με το είδος κεριού η έγχυση επιτυγχάνεται σε υγρή, παχύρρευστη ή και στερεή κατάσταση. Στις πιο απλές περιπτώσεις κρατάμε το καλούπι στο στόμιο της μηχανής και πιέζοντάς το εγχέεται το κερί που βρίσκεται αποθηκευμένο εν θερμώ. Σε πιο απαιτητικές εφαρμογές χρησιμοποιούνται υδραυλικές μηχανές με δυνατότητα ελέγχου της πίεσης της θερμοκρασίας και της ποσότητας του υλικού.

Η έγχυση πλαστικού για την κατασκευή προτύπων ακολουθεί παρόμοια λογική με τη διαφορά του ότι η θερμοκρασία είναι αρκετά μεγαλύτερη φτάνοντας τους 180-260 °C

και η πίεση τα 30-140 MPa. Το πολυεστυρένιο εισέρχεται υπό τη μορφή σκόνης σε μια χοάνη η οποία θερμαίνεται και το ρευστοποιημένο πολυμερές οδηγείται σε κοιλότητες αποθήκευσης για να εγχυθεί.

Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα σε περιπτώσεις λίγων τεμαχίων, γίνεται η απευθείας επεξεργασία του πλαστικού ή του κεριού με εργαλεία χειρός και μηχανήματα, ώστε να αποκτήσουν το επιθυμητό σχήμα.

Συναρμολόγηση προτύπων

Για την κατασκευή μεγάλων και ογκωδών αντικειμένων, η διαδικασία της χύτευσης πραγματοποιείται για ένα μόνο τεμάχιο κάθε φορά. Όταν όμως τα χυτά είναι μεσαίου και μικρού μεγέθους, για εξοικονόμηση χώρου και χρόνου, τα ενώνουμε όλα μαζί, σχηματίζοντας μια συστοιχία, το λεγόμενο δέντρο χύτευσης. Για παράδειγμα πτερύγια κινητήρων αεροσκαφών χυτεύονται κατά δεκάδες ενώ πιο μικρά αντικείμενα ακόμα και κατά εκατοντάδες. Η δημιουργία του δέντρου χύτευσης ξεκινά με τη συγκόλληση όλων των τεμαχίων σε έναν κεντρικό αγωγό. Αυτό επιτυγχάνεται με ένα ηλεκτρικό κολλητήριο ή με ένα θερμό μέταλλο, ώστε να τήξουμε τα δυο τμήματα και πιέζοντάς τα ελαφρά να ενωθούν. Ακολουθεί η προσεκτική διαμόρφωση του σημείου της ένωσης, προσέχοντας να υπάρχει αρκετό κενό ανάμεσα στα τεμάχια και να μην τα φθείρουμε με το κολλητήριο.

Η ίδια διαδικασία κατασκευής ακολουθείται για τα πρότυπα πολυεστυρενίου, που όμως αντί για κολλητήριο χρησιμοποιούμε διαλυτικό για να λιώσουν και να ενωθούν τα δυο τμήματα. Τα τελευταία χρόνια αναπτύσσονται και αυτοματοποιημένες διατάξεις για τη συναρμολόγηση του δέντρου, οι οποίες κολλάνε ζευγάρια προτύπων αντιδιαμετρικά από ένα κυλιόμενο κέρινο αγωγό, με χρήση θερμών λεπίδων χαλκού.

Η κατασκευή του δέντρου είναι πολύ σημαντική για την επιτυχία της χύτευσης και για αυτό πρέπει να λαμβάνουμε υπόψη πολλούς παράγοντες:

- Την ευκολία συναρμολόγησης
- Τον αριθμό των τεμαχίων
- Το ρυθμό απόχυσης του ρευστού μετάλλου
- Την ευκολία σχηματισμού καλουπιού και αποκέρωσης
- Την πλήρωση όλων των κοιλοτήτων
- Το ποσοστό συρρίκνωσης

- ο Την τελική επεξεργασία των χυτών

Απαιτείται δηλαδή ο σωστός σχεδιασμός ενός ανθεκτικού και λειτουργικού για την υπόλοιπη διαδικασία δέντρου.

Διαδικασία:

A. Με κατασκευή κεραμικών κελύφων

Η δημιουργία του κεραμικού κελύφους ξεκινά με τη συνεχή επικάλυψη κεραμικής πάστας πάνω στο κέρινο πρότυπο. Αρχικά το δέντρο εμβαπτίζεται σε λουτρό κεραμικού μίγματος και απομακρύνεται μόλις καλυφθεί ολόκληρο. Έπειτα αφήνεται να ξεπλυθεί το περιττό υλικό και να σχηματιστεί ένα επαρκές και ανθεκτικό στρώμα, στο εσωτερικό του οποίου αποτυπώνεται η επιφάνεια του προτύπου και στο εξωτερικό του βρίσκονται σωματίδια κεραμικού υλικού παρέχοντας επαρκή πρόσφυση για τα υπόλοιπα στρώματα. Η επικάλυψη συνεχίζεται με τον ίδιο τρόπο έως ότου αποκτηθεί το επιθυμητό πάχος του κελύφους. Η σύσταση του κεραμικού μίγματος αποτελείται από:

- ο Την κύρια κεραμική σκόνη, πυριτικές, ζirkόνιο και διάφορες αργλικές σκόνες
- ο Συνδετικά: όπως κολλοειδές πυρίτιο, αιθυλικό πυρίτιο κτλ.
- ο Διαβρεκτικούς παράγοντες
- ο Οργανικά πρόσθετα

και οι αναλογίες τους φαίνονται στον πίνακα

Πίνακας 3: Η σύσταση του κεραμικού μίγματος για την κατασκευή του κελύφους

Ingredients	Composition (%)
Binder solids	5-10
Liquid (from binder or added)	15-30
Refractory powder	60-80

Πριν την εισαγωγή του δέντρου στο μίγμα προηγείται ο καθαρισμός του για να αφαιρεθούν υπολείμματα λιπαντικού, σκόνης ή θραυσμένων κομματιών κεριού. Ο καθαρισμός επιτυγχάνεται με την εμβάπτιση του σε υδατικό διάλυμα ώστε να μην

αλλοιώνεται η επιφάνεια των ομοιωμάτων και έπειτα αφήνεται να στεγνώσει εντελώς για μεγάλο χρονικό διάστημα σε θερμοκρασία δωματίου για να μη δημιουργηθούν ρωγμές. Αφού ολοκληρωθούν οι παραπάνω διαδικασίες και έχουμε το σχηματισμένο κέλυφος με το κέρινο πρότυπο μέσα σε αυτό, ακολουθεί η απομάκρυνσή του μέσω πρόσδοσης θερμότητας, τήκοντάς το. Με την αύξηση της θερμοκρασίας επέρχεται διαστολή του κεριού λίγο πριν υγροποιηθεί και είναι πιθανή η πρόκληση ρωγμών ή ακόμα και το σπάσιμο του κελύφους. Για την αποφυγή του φαινομένου αυτού, είναι συχνή η ταχεία θέρμανση του καλουπιού σε πολύ υψηλή θερμοκρασία που επιτρέπει την τήξη ενός λεπτού στρώματος κεριού μόνο, κοντά στη διεπιφάνεια χωρίς το υπόλοιπο τμήμα να θερμανθεί τόσο ώστε να δημιουργήσει προβλήματα. Έτσι καθώς απομακρύνεται το λεπτό στρώμα μέσω φυσικής ροής, αυξάνει συνεχώς τον ωφέλιμο χώρο και μειώνει την πίεση στο εσωτερικό του κελύφους. Οι δυο πιο συχνά χρησιμοποιούμενες τεχνικές αποκέρωσης είναι οι ακόλουθες:

- ο Σε αποστειρωτικό κλίβανο : Το κέλυφος τοποθετείται σε μονωμένο χιτώνιο και με χρήση κορεσμένου ατμού σε πίεση 550-620 kPa επιτυγχάνεται το λιώσιμο του κεριού σε περίπου 15 λεπτά. Το τηγμένο κερί οδηγείται από αποχετευτικό σύστημα σε συλλέκτη και επαναχρησιμοποιείται. Με αυτήν την τεχνική είναι αδύνατη η τήξη πολυστυρενίου.
- ο Ταχεία αποκέρωση: Πραγματοποιείται με εισαγωγή του κελύφους σε καυτό φούρνο στους 870-1095 °C, ο οποίος διαθέτει διάτρητο πάτο ώστε να ρέει το κερί καθώς τήκεται. Διαθέτει επίσης, διάταξη μετάκαυσης των αερίων που παράγονται για να μην προκαλείται περιβαλλοντική μόλυνση. Η τεχνική αυτή είναι κατάλληλη και για τήξη πλαστικών προτύπων.

Επόμενο στάδιο της χύτευσης ακριβείας είναι το ψήσιμο του κενού πλέον κελύφους που έχει ως στόχο:

- ο Την πλήρη αφύγρανσή του
- ο Την απομάκρυνση υπολειμμάτων κεριού και άλλων ουσιών
- ο Τη σύντηξη και συνένωση των κεραμικών κόκκων
- ο Την προετοιμασία του, στην κατάλληλη θερμοκρασία για την απόχυση του μετάλλου.

Το ψήσιμο γίνεται σε φούρνους, μονωμένους με πυρότουβλα παρέχοντας, με συνεχή κυκλοφορία, 10% ατμοσφαιρικό αέρα, για ομοιόμορφη αύξηση της θερμοκρασίας στους 800-1100 °C. Η ανάπτυξη της θερμοκρασίας γίνεται ομαλά και σταδιακά, συμπληρώνοντας τον λεγόμενο κύκλο θέρμανσης, όπως φαίνεται παρακάτω :

Wax Burnout Schedule

Flask size: up to 2.5 x 5.0 in. (6.3 cm x 12.7 cm)	Flask size: up to 4.0 x 6.0 in. (10.2 cm x 15.2 cm)	Flask size: up to 6.0 x 12.0 in. (15.2 cm x 30.5 cm)
Hold at 300F (150C) for 2 hours	Hold @ 300F (150C) for 3 hours	Hold @ 300F (150C) for 4 hours
Elevate to 1350F (730C) over the next 5 hours	Elevate to 1350F (730C) over the next 6 hours	Elevate to 1350F (730C) over the next 7 hours
Hold at 1350F (730C) for 2 hours	Hold at 1350F (730C) for 3 hours	Hold at 1350F (730C) for 4 hours
Reduce to casting temperature & hold 1 hour before casting.	Reduce to casting temperature & hold for 2 hours before casting.	Reduce to casting temperature & hold for 3 hours before casting.

Πίνακας 4: Η θέρμανση του καλουπιού ανάλογα με το μέγεθος του

Τα πρώτα χρόνια εφαρμογής της μεθόδου, η τήξη των μετάλλων πραγματοποιείτο σε φούρνους με καύσιμη ύλη τα κάρβουνα. Με την εξέλιξη της τεχνολογίας αυτοί αντικαταστάθηκαν από επαγωγικούς φούρνους, οι οποίοι διαθέτουν ειδικές χοάνες που θερμαίνονται με αντιστάσεις και διαθέτουν ειδικές μονάδες ελέγχου. Σε τελευταία μοντέλα φούρνων χρησιμοποιούνται και δυναμό για την παραγωγή της απαιτούμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Η χωρητικότητα τους κυμαίνεται από 7,7kg έως 330 kg αλλά υπάρχουν και μικρότεροι για εφαρμογές ταχείας τήξης μικρών ποσοτήτων μετάλλου. Επίσης υπάρχουν φούρνοι με φλόγα από την καύση υγραερίου ή πετρελαίου που χρησιμοποιούνται για το λιώσιμο αλουμινίου σε χοάνες από γραφίτη και μόνωση αργίλου. Παρά το μικρότερο κόστος τους συγκριτικά με τους ηλεκτρικούς φούρνους έχουν το μειονέκτημα να επιτρέπουν μεγαλύτερη απορρόφηση αερίου υδρογόνου από το τηγμένο μέταλλο γεγονός που οδηγεί στη δημιουργία πορώδους στα χυτά. Άλλα είδη φούρνων είναι αυτοί με χρήση τηκόμενου ηλεκτροδίου και ο φούρνος ηλεκτροδοκού, που απαντώνται στην τήξη τιτανίου[6], [9].

Μετά από την τήξη ακολουθεί η απόχυση του μετάλλου για να γεμίσει το κέλυφος και πραγματοποιείται είτε με κενό είτε με την επίδραση της βαρύτητας. Η απλή απόχυση συναντάται κυρίως στη χύτευση αλουμινίου, μαγνησίου, χαλκού και πολλών ακόμα

κραμάτων που δεν διαθέτουν πρόσμιξη αντιδρώντων στοιχείων. Η χύτευση εν κενώ παρέχει καθαρότερο μέταλλο με καλύτερες ιδιότητες γεγονός που αποτελεί κίνητρο για τη χρήση της, ωστόσο περιορίζεται για κράματα που είναι δύσκολη η απλή απόχυσή τους, όπως για τα κράματα τιτανίου, νικελίου και κοβαλτίου. Να σημειωθεί ότι τα πλεονεκτήματα της χύτευσης ακριβείας είναι εμφανέστερα με χρήση ορισμένων τεχνικών όπως της φυγόκεντρης χύτευσης, της χύτευσης υπό πίεση και τη χύτευση εν κενώ.

Εν τέλει γίνεται η παραλαβή των χυτών, που προϋποθέτει το σπάσιμο του κελύφους. Αυτό επιτυγχάνεται είτε με χρήση κρουστικών μηχανών είτε με την απότομη ψύξη του σε νερό, όπου λόγω του θερμικού σοκ που υπόκειται ψαθυροποιείται και θρυμματίζεται, αποκαλύπτοντας τα χυτά.

B. Με τη δημιουργία στέρεου τύπου:

Η διαδικασία σε αυτήν την περίπτωση δε διαφέρει σημαντικά με την προηγούμενη, αφού και τα χρησιμοποιούμενα υλικά και η κατασκευή των προτύπων είναι ίδια. Η μόνη διαφορά έγκειται στον τύπο που είναι συνήθως από γύψο καλύπτοντας το δέντρο χύτευσης, που βρίσκεται τοποθετημένο σε μια φλάσκα. Το μίγμα της σκόνης γύψου περιέχει και άλλα συστατικά όπως φαίνεται παρακάτω:

Πίνακας 5: Η σύσταση του μίγματος γύψου για την κατασκευή καλουπιού

Ingredients	Composition (%)
Binder solids	5-10
Liquid (from binder or added)	15-30
Refractory powder	60-80

Στη συνέχεια ακολουθεί η αποκέρωση, το ψήσιμο του καλουπιού και η παραλαβή των χυτών όπως παραπάνω. Να σημειώσουμε πως κατά τη χύτευση σιδηρούχων κραμάτων, όπου απαιτούνται υψηλές θερμοκρασίες για την τήξη τους, η χρήση γύψου δεν είναι εφικτή εξαιτίας της ψαθυρότητας του σε τέτοιες συνθήκες. Για αυτό τον λόγο ο τύπος αποτελείται από πυριτική σκόνη και διάφορα συγκολλητικά συστατικά.

Εργασίες μετά τη χύτευση:

Η περαιτέρω επεξεργασία των χυτών για τη βελτίωση της εμφάνισης τους και των ιδιοτήτων τους αποτελούν το 40-55% του συνολικού κόστους, της διαδικασίας. Χαρακτηριστικές κατεργασίες που γίνονται είναι οι ακόλουθες:

- Κρούση: Εξαιτίας της προσκόλλησης ορισμένων συστατικών του καλουπιού στο χυτό είναι απαραίτητη η κρούση ή η δόνηση τους σε υδραυλικές μηχανές ή τα χυτά υποβάλλονται σε αμμοβολή.
- Κόψιμο: Κράματα αλουμινίου, μαγνησίου και χαλκού κόβονται με πριονοκορδέλα ενώ κάποια υπερκράματα με κοπτικό τροχό. Επίσης σε σημεία που δεν είναι δυνατή η πρόσβαση των παραπάνω εργαλείων χρησιμοποιείται φλογοκοπή.
- Αφαίρεση πυρήνων: Αν το μέγεθος των ανοιγμάτων του χυτού το επιτρέπει η διαδικασία γίνεται με χρήση όξινων υδατικών διαλυμάτων ή με λουτρό υδροξειδίου του Νατρίου σε θερμοκρασία 480-540°C.
- Κατεργασία εν θερμώ: Πραγματοποιείται για την επίτευξη ομοιόμορφης δομής του χυτού.
- Λείανση: Εκτελείται για τον καθαρισμό των πλινθωμάτων με τη βοήθεια πνευματικών μηχανών και τη χρήση τόσο κεραμικών όσο και μεταλλικών στοιχείων
- Άλλες διεργασίες: Σημαντική για την πυκνότητα των χυτών και την εξάλειψη πόρων είναι η ισοστατική πίεση που υποβάλλονται, με αποτέλεσμα την αύξηση της αντοχής τους και της ολκιμότητας τους. Επίσης είναι πιθανή η μηχανουργική κατεργασία ή η συγκόλληση των πλινθωμάτων σε περιπτώσεις που δεν επιτυγχάνεται η απαιτούμενη ακρίβεια ή για τη συνένωση των διαφόρων κομματιών ενός χυτού. Τέλος λαμβάνουν χώρα και χημικές κατεργασίες κυρίως για τον καθαρισμό και το γυάλισμα κραμάτων αλουμινίου και ανοξειδώτου χάλυβα.

Πλεονεκτήματα της μεθόδου:

- Επίτευξη γεωμετρικής πολυπλοκότητας: με τη χύτευση ακριβείας είναι δυνατή η κατασκευή χυτών με οποιαδήποτε βαθμό εξωτερικής και εσωτερικής πολυπλοκότητας. Έτσι μπορεί να γίνει επανασχεδιασμός ενός

χυτού με αποτέλεσμα τη μείωση του βάρους, του απαιτούμενου υλικού και τελικά του κόστους του.

- Χυτευσιμότητα μεγάλης ποικιλίας κραμάτων: Είναι δυνατή η χύτευση οποιουδήποτε σχεδόν κράματος, ακόμα και αυτών που σφυρηλατούνται ή επεξεργάζονται δύσκολα.
- Εξαιρετική ακρίβεια διαστάσεων: Η απουσία διαχωριστικής γραμμής στο χυτό και ο περιορισμός που απαιτούν, οδηγούν στην παρασκευή χυτών μεγάλης ακρίβειας ειδικά συγκρινόμενη με αυτή συμβατικών μεθόδων.
- Διαθεσιμότητα προτύπων και εύκολη επεξεργασία τους: Η χρήση φθινών υλικών για την κατασκευή προτύπων όπως το κερί και το πλαστικό, σε συνδυασμό με την εύκολη επεξεργασία τους καθιστά τη μέθοδο γρήγορη και σχετικά οικονομική, αφού δεν απαιτούνται ειδικές εγκαταστάσεις.
- Αξιοπιστία: Η χρήση της μεθόδου σε εφαρμογές πολύ υψηλών ποιοτικών απαιτήσεων αποδεικνύει την αξιοπιστία και την ποιότητα των παραγόμενων αντικειμένων.
- Μεγάλο εύρος εφαρμογής: Εκτός από χυτά μεγάλης ακρίβειας και πολυπλοκότητας, η χύτευση ακριβείας χρησιμοποιείται και για την κατασκευή πολύ απλών τεμαχίων σε ποικιλία διαστάσεων και βάρους από μερικά γραμμάρια έως 300 kg.

Μειονεκτήματα της μεθόδου;

- Απαιτούνται έμπειρα άτομα για την κατασκευή των καλουπιών και των ομοιωμάτων
- Υψηλό σχετικά κόστος
- Μεγάλο χρονικό διάστημα προετοιμασίας

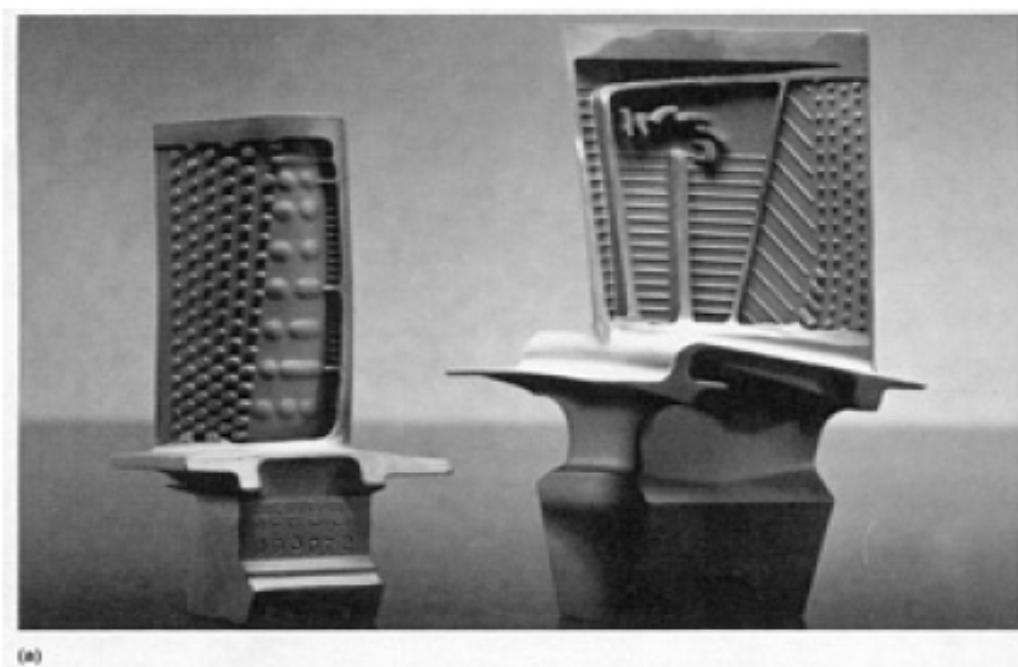
Εφαρμογές

Η χύτευση ακριβείας βρίσκει εφαρμογή σχεδόν σε όλες τις κατασκευαστικές βιομηχανίες. Ο μεγαλύτερος αριθμός προϊόντων της απαντάται στις αεροπορικές και αεροδιαστημικές βιομηχανίες, κυρίως για την κατασκευή πτερυγίων για τουρμπίνες, χυτές βαλβίδες από κράματα κοβαλτίου ή νικελίου καθώς και για εξαρτήματα από

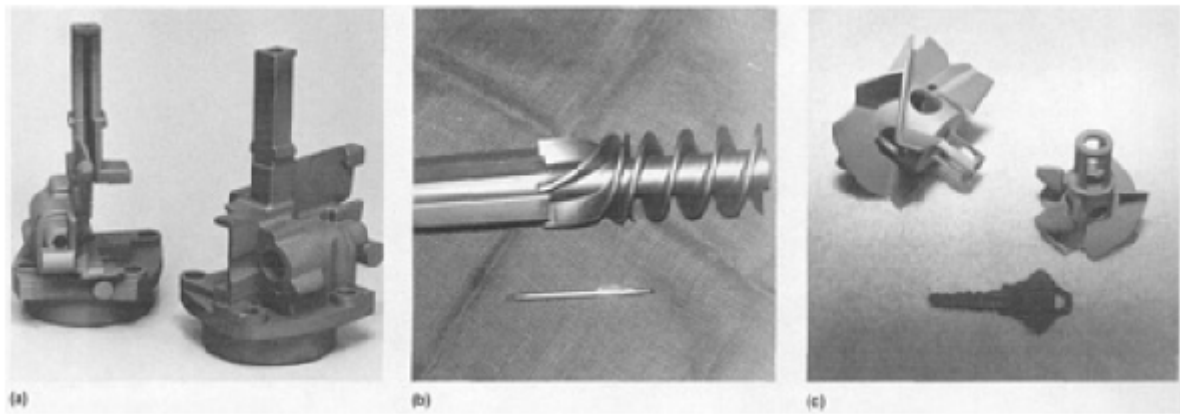
υπερκράματα τιτανίου και ανοξείδωτου χάλυβα. Άλλα παραδείγματα αντικειμένων που προέρχονται από τη χύτευση ακριβείας είναι:

- Σε αυτοκίνητα
- Σε computer, ηλεκτρονικές συσκευές και κάμερες
- Στην οπλοβιομηχανία
- Στις εξέδρες εξόρυξης πετρελαίου
- Στην χρυσοχοΐα
- Στην οδοντιατρική
- Στα radar

Παρακάτω φαίνονται εικόνες χυτών της μεθόδου:



Εικόνα 2 14 : Πτερύγια στροβίλου κατασκευασμένα με τη μέθοδο ακριβείας



Εικόνα 2 15: Διάφορα τεμάχια υψηλών απαιτήσεων ακρίβειας

2.1.3. Φυγοκεντρική Χύτευση (Centrifugal Casting)

Η φυγοκεντρική χύτευση βρίσκει εφαρμογή κυρίως σε περιπτώσεις κατασκευής συμμετρικών τεμαχίων, με κυλινδρική ή σφαιρική μορφή. Το τήγμα αποτίθεται σε καλούπι που περιστρέφεται είτε σε οριζόντιο είτε σε κάθετο επίπεδο, ανάλογα με το μέγεθος του χυτού. Η πλήρωση του γίνεται σε απόσταση από τον άξονα περιστροφής και η μεταφορά του ρευστού επιτυγχάνεται μέσω των φυγόκεντρων δυνάμεων.

2.1.3.1 Οριζόντια φυγοκεντρική χύτευση [2], [4]

Η τεχνική αυτή χρησιμοποιεί τις αναπτυσσόμενες φυγόκεντρες δυνάμεις σε ένα περιστρεφόμενο καλούπι για να εισαχθεί το τηγμένο μέταλλο στην κοιλότητα και να αναπαραχθεί το επιθυμητό σχήμα. Η πρώτη εφαρμογή έγινε στις αρχές του 19^{ου} αιώνα στην Μ. Βρετανία και βρήκε βιομηχανική χρήση το 1848 στη Βαλτιμόρη για την κατασκευή σωλήνων. Τα αρχικά αντικείμενα που κατασκευάστηκαν με φυγοκεντρική χύτευση, ήταν δακτύλιοι σιδήρου και χάλκινοι σωλήνες. Με το πέρασμα των χρόνων βελτιώθηκαν τόσο η διαδικασία όσο και η ποιότητα των χρησιμοποιούμενων υλικών, επιτυγχάνοντας έτσι χυτά με καλύτερες μεταλλουργικές και μηχανικές ιδιότητες. Στις μέρες μας χρησιμοποιείται ευρέως για την παρασκευή λεπτότοιχων σωλήνων από ατσάλι ή διμεταλλικά κράματα, για τη χημική, πετρελαϊκή και παράκτια βιομηχανία.

Μηχανές- εξοπλισμός:

Μια οριζόντια μηχανή φυγοκεντρικής χύτευσης πρέπει να μπορεί να εκτελεί τις παρακάτω διεργασίες με ακρίβεια και επαναληψιμότητα:

- Περιστροφή του καλουπιού στην προκαθορισμένη ταχύτητα
- Έγχυση του ρευστού μετάλλου στο καλούπι
- Εξασφάλιση του κατάλληλου ρυθμού στερεοποίησης του χυτού
- Να επιτρέπει την εύκολη εξαγωγή των χυτών από τον τύπο

Καλούπι:

Στις οριζόντιες μηχανές χρησιμοποιούνται καλούπια που ψύχονται από ψεκασμό νερού και αποτελούνται από τέσσερα τμήματα: το κέλυφος, το στόμιο εισόδου του ρευστού μετάλλου, τις κεφαλές (καπάκια) και τους οδηγούς περιστροφής. Ανάλογα με την

ποσότητα, τη γεωμετρία και το είδος του μετάλλου υπάρχουν πολλά είδη καλουπιών, μόνιμα ή μη.

Οι μη μόνιμοι τύποι είναι συνήθως κατασκευασμένοι από:

- ο Πράσινη άμμο: με πρόσμιξη στην πυριτική άμμο νερού, επεξεργασμένου τσιμέντου, συνδετικών, ρητινών, μπετονίτη κτλ.
- ο Ξηρή άμμο: όπου η άμμος περισφίγγεται γύρω από ένα πρότυπο του επιθυμητού σχήματος και η στερεοποίησή της υποβοηθάται από τη χρήση διοξειδίου του άνθρακα.

Επίσης είναι σύνηθες να γίνεται επίχριση των καλουπιών στην εσωτερική τους επιφάνεια, για να αποκτούν μεγαλύτερη σκληρότητα και αντοχή στη διάβρωση από το καυτό μέταλλο.

Τα μόνιμα καλούπια κατασκευάζονται από:

- ο Ατσάλι: σε χύτευση πολλών τεμαχίων και για περιπτώσεις ειδικών απαιτήσεων στερεοποίησης. Εξαιτίας της ευαισθησίας τους στα θερμικά φορτία πραγματοποιούνται προσμίξεις στη σύστασή τους και επιπλέον συνδυάζονται με κεραμικές επιστρώσεις αλουμίνας και ζirkονίου στο εσωτερικό τους.
- ο Χαλκό: εφαρμόζεται σε σπάνιες περιπτώσεις εξαιτίας της μεγάλης θερμικής αγωγιμότητας που διαθέτουν και τη δυσκολία υπολογισμού των ακριβών διαστάσεων του.
- ο Γραφίτη: διακρίνονται για το χαμηλό κόστος και την εύκολη επεξεργασία τους. Χρησιμοποιούνται κυρίως για χύτευση μικρών ποσοτήτων χάλκινων αντικειμένων. Διαθέτουν εξαιρετική θερμική αγωγιμότητα και αντοχή στα θερμικά φορτία.

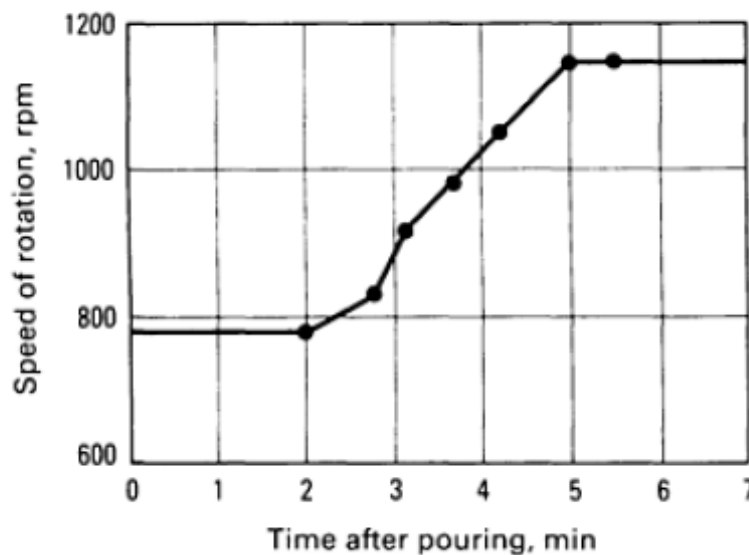
Διαδικασία:

Η έγχυση του μετάλλου μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε από το ένα άκρο του καλουπιού, είτε και από τα δυο ή ακόμα και από ειδικά σχεδιασμένο σύστημα αγωγών. Ο ρυθμός απόχυσης εξαρτάται από το μέταλλο, το μέγεθος του χυτού και το υλικό του καλουπιού και είναι σημαντικό να προσεχθεί ιδιαίτερα, αφού πολλά σφάλματα, όπως ασυνέχειες, ρωγμές κτλ είναι πιθανό να προκληθούν από ακατάλληλο ρυθμό απόχυσης. Επιπλέον

σημαντικός είναι και ο βαθμός υπερθέρμανσης του μετάλλου πριν την έγχυσή του, αφού καθορίζει την κατάλληλη ταχύτητα περιστροφής του καλουπιού, το ρυθμό στερεοποίησης και το ποσοστό διαφορισμού που θα λάβει χώρα. Σημαντική παράμετρος είναι η ταχύτητα περιστροφής ώστε να παράγεται δύναμη 75-120 g, και χωρίζεται σε τρία στάδια ανάλογα με την πορεία της χύτευσης:

- Κατά τη διάρκεια της έγχυσης: το καλούπι περιστρέφεται με τέτοια ταχύτητα που να επιτρέπεται στο τηγμένο μέταλλο να φτάνει στα τοιχώματα του καλουπιού.
- Κατά το τέλος της έγχυσης: όπου η ταχύτητα περιστροφής αυξάνεται ομαλά
- Μετά το τέλος της έγχυσης: η ταχύτητα διατηρείται σταθερή και εξαρτάται από το υλικό του καλουπιού, του μετάλλου και του απαιτούμενου πάχους.

Η ιδανική ταχύτητα περιστροφής είναι καθοριστική για την σωστή εφαρμογή του χυτού στο καλούπι, με τις λιγότερες δυνατές δονήσεις και την απόκτηση ομοιόμορφης σύστασης.



Διάγραμμα 2 1: Η ταχύτητα περιστροφής του καλουπιού, συνάρτησι του χρόνου μετά την απόχυση του τήγματος

Καθώς εισέρχεται το τήγμα στο καλούπι δημιουργείται βαθμιαία πτώση της πίεσης προς τα εσωτερικά στρώματα, εξαιτίας της φυγόκεντρης επιτάχυνσης, με αποτέλεσμα τη συγκέντρωση μικροακαθαρσιών και μη μεταλλικών εγκλεισμάτων. Χαμηλές ταχύτητες

περιστροφής προκαλούν παλινδρόμηση και φτωχές επιφανειακές ιδιότητες του πλινθώματος, ενώ πολύ υψηλές οδηγούν σε έντονο διαφορισμό με αποτέλεσμα τη δημιουργία ρωγμών.

Στην οριζόντια φυγοκεντρική χύτευση η μεταφορά θερμότητας πραγματοποιείται μόνο από το εξωτερικό τοίχωμα του καλουπιού που ψύχεται από το νερό. Η στερεοποίηση ξεκινά από τα εξωτερικά στρώματα συνεχίζοντας προς το εσωτερικό του χυτού και επηρεάζεται από τους εξής παράγοντες:

- Το υλικό του τύπου, την αρχική του θερμοκρασία και το πάχος του
- Από τα επιχρίσματα του καλουπιού
- Την υπερθέρμανση, το ρυθμό απόχυσης του μετάλλου και την ταχύτητα περιστροφής
- Τις δονήσεις της μηχανής

Οι πιο σημαντικές παράμετροι είναι το πάχος του καλουπιού και η υπερθέρμανση του τήγματος που επηρεάζουν την τοπική στερεοποίηση και την τελική μικροδομή του χυτού.

Πλεονεκτήματα της μεθόδου:

- Χύτευση σχεδόν όλων των κραμάτων με εξαίρεση των υψηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα χαλύβων ($>0,40-0,85\% \text{ C}$)
- Μεγάλο εύρος στα χαρακτηριστικά του χυτού: είναι δυνατή η πρόσδοση συγκεκριμένων μηχανικών ιδιοτήτων στο χυτό, όπως θερμική αντοχή, αντοχή στη διάβρωση, ομοιογενή σύσταση και συγκεκριμένη υφή
- Ευελιξία στο μέγεθος των αντικειμένων: επιτρέπεται η κατασκευή σωλήνων με μέγιστη εξωτερική διάμετρο 1,6m και πάχος μέχρι 200mm.

Η φυγοκεντρική χύτευση απαντάται στη βιομηχανία σιδήρου-χάλυβα για την παραγωγή σωλήνων, κυλίνδρων και την περιέλιξη πηνίων. Επίσης η πλατφόρμες εξόρυξης πετρελαίου χρησιμοποιούν δίκτυα αγωγών που προέρχονται από τη συγκεκριμένη μέθοδο. Τέλος, προϊόντα της συναντώνται σε εκτυπωτικές μονάδες (κύλινδροι, ράουλα κτλ), σε εργοτάξια και στη χημική βιομηχανία.

2.1.3.2 Κάθετη φυγοκεντρική χύτευση [2],[7]:

Εκτός από την οριζόντια μέθοδο, που χρησιμοποιείται για την κατασκευή κυλινδρικών, σφαιρικών ή σωληνοειδών αντικειμένων, υπάρχει και η κάθετη με μεγαλύτερο εύρος δυνατών γεωμετριών. Είναι δυνατή η κατασκευή πολύπλοκων τεμαχίων χωρίς να έχουν κάποιου είδους συμμετρία. Οι βασικές αρχές και σε αυτήν την περίπτωση είναι κοινές με την οριζόντια χύτευση και είναι η τεχνική που εξασφαλίζει τη μεγαλύτερη οικονομία υλικού, υψηλή ποιότητα χυτού και μικρό κόστος καλουπιού. Εξαιτίας της απουσίας σφαλμάτων, τα παραγόμενα χυτά είναι ισότροπα, αφού διαθέτουν τις ίδιες ιδιότητες σε όλες τις διευθύνσεις. Χρησιμοποιούνται καλούπια άμμου, μόνιμα ή ημι-μόνιμα και είναι δυνατή η χύτευση όλων των κραμάτων, σιδηρούχων ή μη.

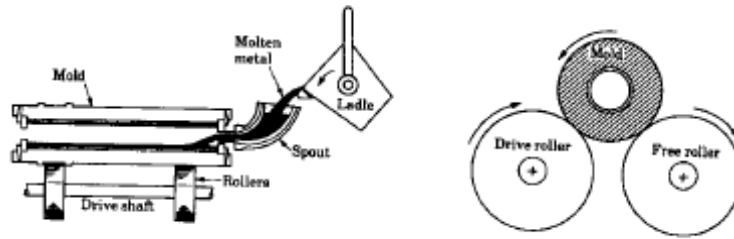
Η κατηγορία της φυγόκεντρης χύτευσης διακρίνεται σε τρεις παραλλαγές:

- Πραγματική φυγόκεντρη χύτευση
- Ημι-φυγόκεντρη
- Φυγοκέντριση

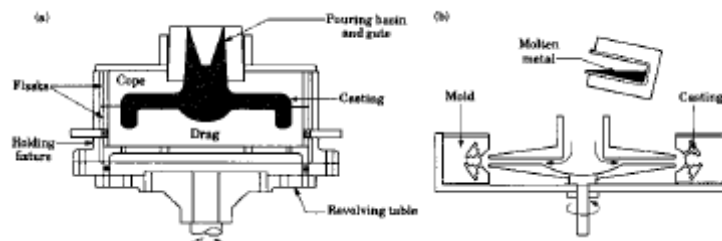
Η πραγματική φυγόκεντρη χύτευση χρησιμοποιείται για την κατασκευή κυλινδρικών η σφαιρικών αντικειμένων με περιστροφή του καλουπιού γύρω από τον άξονα του. Πραγματοποιείται κατά οριζόντιο ή κάθετο άξονα και δεν απαιτεί τη χρήση κεντρικού πυρήνα στο καλούπι. Τα παραγόμενα χυτά διακρίνονται για την απουσία σφαλμάτων και την υψηλή τους ποιότητα.

Η ημι-φυγόκεντρη χύτευση πραγματοποιείται συνήθως κατά τον κατακόρυφο άξονα και προτιμάται από τις στατικές μεθόδους αφού συνδυάζει την υψηλή αντοχή και το μικρότερο κόστος. Χαρακτηριστικά αντικείμενα που παρασκευάζονται με αυτήν την τεχνική είναι: τροχαλίες, φτερωτές, τροχοί και ρότορες ηλεκτρικών κινητήρων.

Η φυγοκέντριση έχει το μεγαλύτερο πεδίο εφαρμογής. Οι κοιλότητες κατανέμονται γύρω από τον άξονα του καλουπιού και έτσι επιτυγχάνεται η χύτευση πολλών αντικειμένων. Τυπικά προϊόντα της μεθόδου είναι κολάρα, μπρακέτα και ζυγοί.



Εικόνα 2 16: Πραγματική φυγοκεντρική χύτευση



Εικόνα 2 17: Η φυγοκέντρωση

Το σύστημα τροφοδοσίας στις δυο τελευταίες κατηγορίες συνδυάζει τον αγωγό εισόδου και τον αγωγό ροής του μετάλλου. Από τις μεγάλες δυνάμεις που αναπτύσσονται λόγω της περιστροφής επιτυγχάνεται καλύτερη πλήρωση του καλουπιού. Έτσι ακόμα και σε περιπτώσεις ογκωδών αντικειμένων και μικρής διαμέτρου αγωγού τροφοδοσίας, έχουμε σωστή πλήρωση του τύπου. Και εδώ συναντάμε καλούπια από πράσινη και ξηρή άμμο με ίδια φιλοσοφία επιλογής της ταχύτητας περιστροφής. Τα μόνιμα καλούπια που χρησιμοποιούνται είναι κατασκευασμένα από χάλυβα ή γραφίτη.

Τα πρώτα προτιμώνται για την καλή επιφάνεια που παρέχουν στο χυτό αλλά χρειάζονται προσοχή όταν ψύχονται με νερό γιατί είναι πιθανή η εμφάνιση ρωγμών. Επίσης για εύκολη εξαγωγή των πλινθωμάτων, η εσωτερική τους επιφάνεια καλύπτεται με ειδικό λιπαντικό με βάση το μολυβδαίνιο. Η στήριξη των τύπων στη μηχανή γίνεται πάνω σε τράπεζες που διαθέτουν τους κατάλληλους μηχανισμούς συγκράτησης.

Τα καλούπια γραφίτη διακρίνονται για την εύκολη μορφοποίησή τους και μπορούν να κατασκευαστούν με λεπτό τοίχωμα σε σύγκριση με το πάχος του χυτού. Προσοχή δίνεται στο χρόνο που μεσολαβεί μεταξύ δυο διαδοχικών χυτεύσεων, ώστε να κρυώσει επαρκώς ο τύπος σε θερμοκρασία 95-150 °C και να μην παρουσιάζονται σημάδια οξείδωσής τους. Για την αποφυγή δημιουργίας σφαλμάτων και διάβρωσης του μετάλλου, η πλήρωση του καλουπιού πραγματοποιείται σε σχετικά χαμηλή ταχύτητα περιστροφής και σε

θερμοκρασία 40 °C μεγαλύτερη από την ανάλογη σε περίπτωση στατικής μεθόδου χύτευσης. Προσοχή πρέπει να δοθεί ώστε στις εξωτερικές στοιβάδες του αντικειμένου, η φυγόκεντρος δύναμη να μην ξεπεράσει τα 200g για λόγους ασφαλείας. Για την απουσία διακενώσεων και ψυχρών εγκλεισμάτων, ο αρχικός ρυθμός έγχυσης είναι αρκετά υψηλός και κυμαίνεται περίπου στα 9 kg/s για χυτά μικρότερα των 45 kg , στα 23 kg/s για χυτά μεγαλύτερα από 450 kg και 45-90 kg/s για χυτά άνω των 500 kg. Κατά την τροφοδοσία σε κατακόρυφη φυγοκέντριση πρέπει να δοθεί έμφαση ώστε να περιοριστεί η τυρβώδης ροή του μετάλλου που καταστρέφει το τελικό αντικείμενο. Αυτό επιτυγχάνεται με τον κατάλληλο σχεδιασμό των αγωγών τροφοδοσίας και με τη χρήση ειδικών χοανών που κατευθύνουν το τήγμα ανάλογα με τη φορά περιστροφής. Σε αντίθεση με την πραγματική φυγόκεντρο διαδικασία, η φυγοκέντριση δεν παρουσιάζει σημαντικά φαινόμενα διαφορισμού, που εμφανίζονται μόνο σε λεπτότοιχα τεμάχια (< 75 mm). Οι αιτίες που τον προκαλούν είναι οι ακόλουθες:

- Οι δονήσεις που κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης επιτρέπουν την ύπαρξη υγρής ζώνης ανάμεσα σε σχηματισμένους κρυστάλλους. Οφείλεται δηλαδή στη διακοπή της διαδικασίας πυρινοποίησης από τις δονήσεις.
- Η ανομοιομορφία στη ροή του ρευστού μετάλλου, που επιτρέπει την επικάθηση ρευστού μετάλλου πάνω σε ήδη στερεοποιημένο σημείο.
- Από τη διαφορά των βαρυτικών δυνάμεων μεταξύ άνω και κάτω τμήματος του καλουπιού.

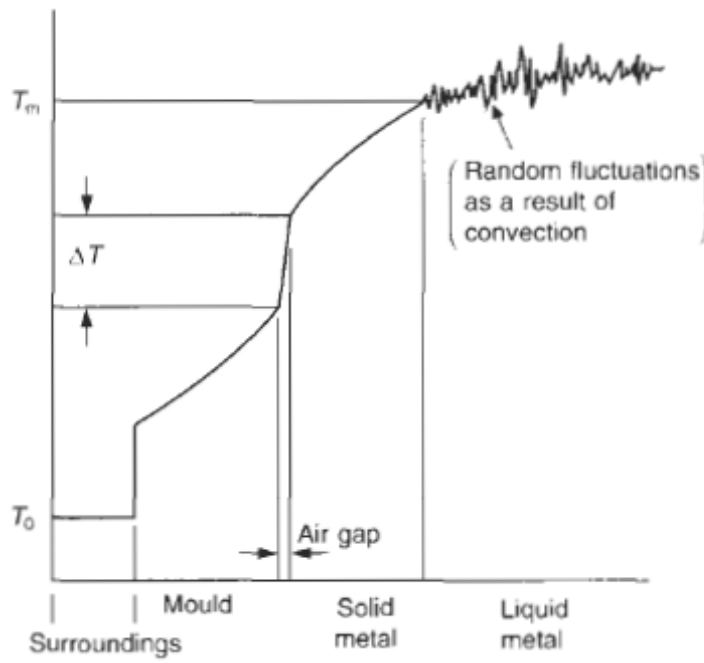
Ο περιορισμός των δονήσεων μπορεί να επιτευχθεί με τη σωστή στήριξη και το ζύγισμα του καλουπιού, καθώς και με τον έλεγχο των εξαρτημάτων της μηχανής.

2.1.4. Συντελεστής Μετάδοσης Θερμότητας

Από τη στιγμή της απόχυσης του τηγμένου μετάλλου στο καλούπι, μέχρι τη στερεοποίησή του, μεσολαβεί ένα χρονικό διάστημα που εξαρτάται από τους παράγοντες που δρουν ως αντιστάσεις της μεταφοράς θερμότητας, από το εσωτερικό του τύπου προς τον περιβάλλοντα χώρο. Οι αντιστάσεις αυτές είναι:

- Το υγρό μέταλλο
- Το στερεοποιημένο μέταλλο
- Η διεπιφάνεια καλουπιού-χυτού
- Το καλούπι
- Ο περιβάλλοντας χώρος

Οι αντιστάσεις φαίνονται και στο ακόλουθο διάγραμμα:



Διάγραμμα 2.2: Οι αντιστάσεις της μεταφοράς θερμότητας, από το εσωτερικό του τύπου προς το περιβάλλον

Όπως συμβαίνει συνήθως, έτσι και σε αυτήν την περίπτωση, η αντίσταση του τηγμένου μετάλλου, που προέρχεται από την εξαναγκασμένη μεταφορά θερμότητας κατά την απόχυση και κατά την ψύξη του είναι αμελητέα. Πράγματι, η τυρβώδης ροή που δημιουργείται μεταδίδει ταχύτατα τη θερμότητα εξισώνοντας τις μεγάλες διαφορές

θερμοκρασίας, στον ψυχρότερο τύπο. Ο χρόνος δηλαδή που μεσολαβεί για να καταλάβει το τήγμα όλο τον χώρο του καλουπιού δεν επαρκεί για την ανάπτυξη υπολογίσιμης αντίστασης [9], [11], [12].

Ανάλογα με το είδος της χύτευσης και το πάχος του καλουπιού, η αντίσταση μεταξύ του περιβάλλοντος και του τύπου δεν είναι σημαντική. Για παράδειγμα, κατά τη χύτευση με άμμο το περιβάλλον δεν επηρεάζει καθόλου τη διαδικασία στερεοποίησης, εξαιτίας του μεγάλου πάχους και της πυκνότητας του καλουπιού. Ωστόσο υπάρχουν και εξαιρέσεις, σε περιπτώσεις χρήσης λεπτότοιχων καλουπιών, τα οποία παρουσιάζουν μεγάλη ευαισθησία στις συνθήκες του περιβάλλοντος, όπως συμβαίνει στη χύτευση Cironing.

Οι σημαντικότερες λοιπόν αντιστάσεις στη μεταφορά θερμότητας είναι αυτές του στερεοποιημένου μετάλλου, της διεπιφάνειας και η αντίσταση από το πάχος του καλουπιού. Ο υπολογισμός τους μπορεί να πραγματοποιηθεί, είτε πειραματικά, είτε προσεγγιστικά με τη χρήση H/Y και είναι πολύ σημαντικός αφού επηρεάζει όχι μόνο το ρυθμό στερεοποίησης αλλά και την ποιότητα του χυτού ανάλογα με την αναπτυσσόμενη μικροδομή. Ας εξετάσουμε αναλυτικά κάθε αντίσταση ξεχωριστά.

I. Αντίσταση στερεοποιημένου μετάλλου:

Η μονοδιάστατη ροή θερμότητας μεταξύ τηγμένου μετάλλου, θερμοκρασίας T_m και τοιχώματος καλουπιού, θερμοκρασίας T_o , περιγράφεται από την ακόλουθη διαφορική εξίσωση:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a_s \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (2.1)$$

Όπου a_s : η θερμική διαχυτότητα στη στερεή φάση και οριακές συνθήκες για $x=0$, $T=T_o$ και για $x=s$, $T=T_m$

Και στο μέτωπο της στερεοποίησης ισχύει η σχέση:

$$H\rho_s \left(\frac{\partial S}{\partial t} \right) = K_s \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=s} \quad (2.2)$$

όπου

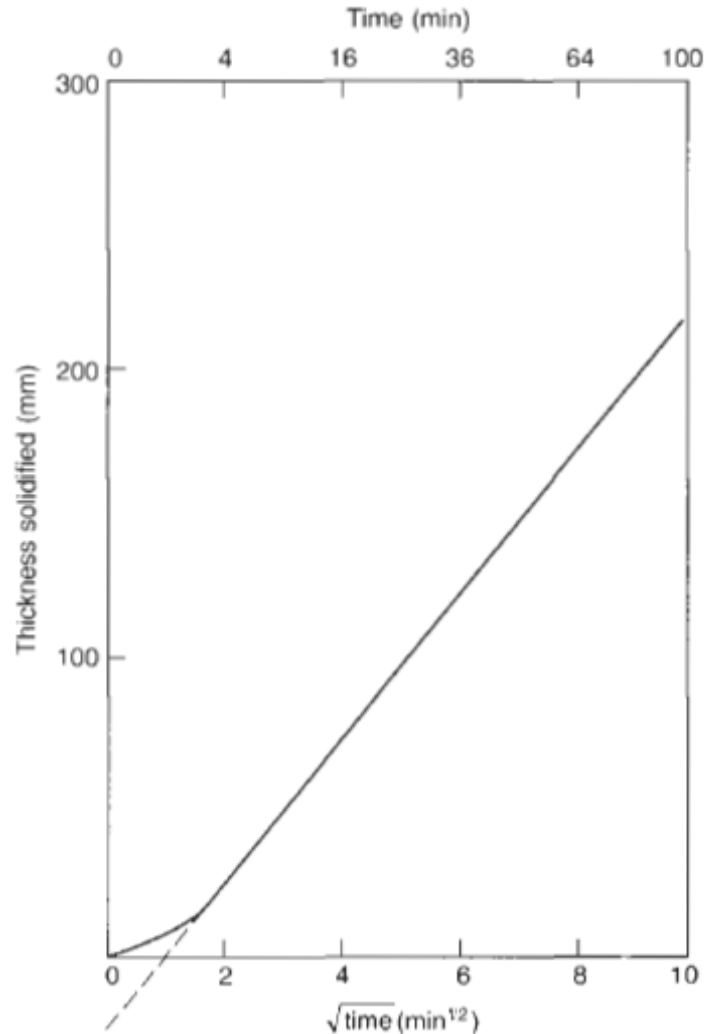
ρ_s : Η πυκνότητα στη στερεή φάση

K_s : Η θερμική αγωγιμότητα

H: η λανθάνουσα θερμότητα και

S: Το πάχος στερεοποίησης

Τα αποτελέσματα φαίνονται στο ακόλουθο διάγραμμα για μέταλλο σιδήρου και καλούπι από χυτοσίδηρο:



Διάγραμμα 2.3: Η μονοδιάστατη στερεοποίηση του καθαρού σιδήρου σε καλούπι από χυτοσίδηρο.

Η λύση της (2.2) μας δίνει το πάχος της στερεοποίησης S:

$$S = 2 \cdot \gamma \sqrt{\alpha_s t}$$

Όπου γ : η ειδική πυκνότητα του μετάλλου.

Που συμφωνεί αρκετά με την προσέγγιση που λαμβάνεται χρησιμοποιώντας τον παρακάτω τύπο:

$$S = \alpha \cdot t^{1/2} - b$$

Όπου τα a , b παίρνουν τιμές από 3 έως 25 για μονάδες σε mm και second του S και του t αντίστοιχα.

Η αρχική υστέρηση που παρατηρούμε στο διάγραμμα οφείλεται στο συντελεστή b και εξαρτάται από:

- Την τυρβώδη ροή του τήγματος κατά τη διάρκεια της απόχυσης και αμέσως μετά, που επιδρά στην πτώση της θερμοκρασίας και επομένως στην πήξη του μετάλλου
- Στην πεπερασμένη αντίσταση της διεπιφάνειας που επιβραδύνει περαιτέρω την αποβολή θερμότητας.

Να σημειώσουμε πως παρόλο που στο διάγραμμα φαίνεται γραμμικός ο ρυθμός στερεοποίησης, σε όλα του στάδια, στην πραγματικότητα μεταβάλλεται παραβολικά. Αυτό οφείλεται στις μονάδες που έχουμε ορίσει στον x-άξονα.

II. Αντίσταση διεπιφάνειας μετάλλου-καλουπιού:

Κατά την είσοδο του τηγμένου μετάλλου παρατηρείται πολύ καλή συνοχή με τα τοιχώματα του καλουπιού, χωρίς τη δημιουργία κενών. Ωστόσο καθώς το μέταλλο ψύχεται, συρρικνώνεται, ενώ ταυτόχρονα το καλούπι θερμαίνεται και επομένως διαστέλλεται. Έτσι έχουμε απώλεια της καλής τους επαφής δημιουργώντας κενό ανάμεσα τους. Για τη μονοδιάστατη ροή θερμότητας που αναπτύσσεται κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης ισχύει:

$$q = -\rho_s H A \frac{\partial S}{\partial A} \quad (2.3)$$

Όπου:

q : η ενέργεια

ρ : η πυκνότητα του μετάλλου

H : η λανθάνουσα θερμότητα

A : το εμβαδό της διεπιφάνειας

Αυτό το ποσό θερμότητας μεταφέρεται στο καλούπι μέσω της κοινής επιφάνειας μετάλλου και καλουπιού και ισχύει:

$$q = -hA(T_m - T_0) \quad (2.4)$$

Όπου:

T_m : η θερμοκρασία του τήγματος και T_0 : η αρχική θερμοκρασία του καλουπιού.

h : ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας.

Υποθέτοντας ότι ο τύπος έχει επαρκές μέγεθος που να μην επιτρέπει την ακαριαία αύξηση της θερμοκρασίας του από T_0 σε T_m και ότι έχουμε σταθερό συντελεστή μετάδοσης θερμότητας h , επιλύοντας τις δύο προηγούμενες σχέσεις, προκύπτει:

$$S = \frac{h(T_m - T_0)}{\rho_\sigma H} t \quad (2.5)$$

Το δημιουργούμενο κενό μεταξύ καλουπιού και χυτού, d , μπορεί να προσεγγιστεί συναρτήσει της διαμέτρου D του χυτού [15]:

$$d / D = a_c (T_f - T) + \alpha_m (T_{mi} - T_0) \quad (2.6)$$

Όπου

a_c : ο συντελεστής θερμικής διαστολής του χυτού

α_m : ο συντελεστής θερμικής διαστολής του μετάλλου

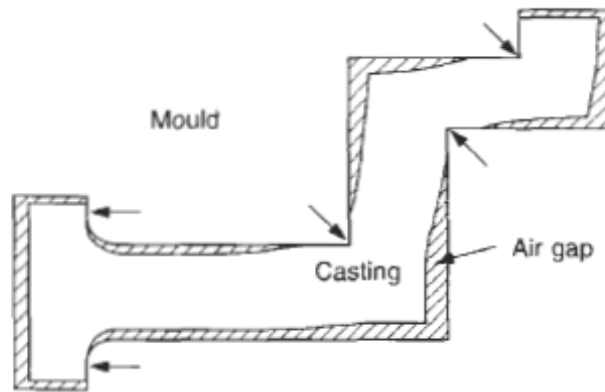
T_f : η θερμοκρασία στερεοποίησης

T_{mi} : η θερμοκρασία της διεπιφάνειας

T_0 : η αρχική θερμοκρασία του καλουπιού

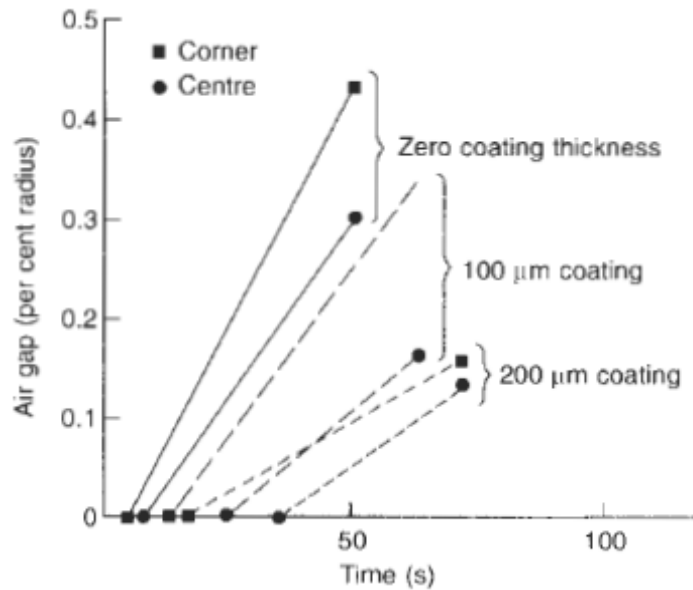
Η παραπάνω σχέση (2.6) μας δείχνει πόσο γραμμική είναι η ανάπτυξη του κενού και φανερώνει πως για ένα χυτό μήκους 1 μέτρου που ψύχεται σε θερμοκρασία δωματίου, η διαστολή του θα είναι περίπου 10 mm σε κάθε πλευρά του. Σίγουρα το αποτέλεσμα είναι μη αποδεκτό, ωστόσο μας δίνει μια πρόχειρη αρχική ένδειξη της αλλαγής των διαστάσεων. Για παράδειγμα σε χύτευση αλουμινένιων πλακών διαστάσεων 300x300x25 mm σε καλούπι πράσινης άμμου, η προσεγγιστική τιμή του κενού είναι 25 μm. Στην πράξη όμως δεν είχαμε τη δημιουργία κενού. Το σφάλμα προέρχεται από την υπόθεση που κάναμε για ομοιόμορφη διαστολή του καλουπιού που δεν ισχύει σε πολλά είδη χύτευσης. Ένας άλλος λόγος είναι ότι σε μαλακά καλούπια η διαστολή έχει κατεύθυνση

προς το εξωτερικό μέρος ενώ σε στιβαρά, προς το εσωτερικό (και προς το χυτό). Σημαντικός παράγοντας είναι και η γεωμετρία του χυτού που σε σημεία απότομης μεταβολής της παρουσιάζεται ισχυρή εσωτερική πίεση και επομένως καλή επαφή με τον τύπο. Έτσι τα κενά εμφανίζονται σε άλλα σημεία, η θέση των οποίων είναι δύσκολο να προβλεφθεί ακόμα και με χρήση Η/Υ.



Εικόνα 2 8: Δημιουργία κενών σε σημεία χαμηλής πίεσης του καλουπιού

Στο επόμενο διάγραμμα γίνεται κατανοητό πως επηρεάζεται το μέγεθος του δημιουργούμενου κενού ανάλογα με το πάχος του καλουπιού και το σημείο του χυτού (γωνίες ή κέντρο του χυτού)



Διάγραμμα 2.4: Η επίδραση του πάχους της επικάλυψης των μεταλλικών καλουπιών, στην αύξηση του διακένου.

Παρατηρούμε ότι με την αύξηση της επικάλυψης του τύπου, άρα και της στιβαρότητας, επιτυγχάνεται μείωση του χρόνου στερεοποίησης αλλά και του ρυθμού ανάπτυξης του διακένου.

Η ανάλυση του συντελεστή μετάδοσης θερμότητας για την περιοχή του διακένου θα γίνει σύμφωνα με τη θεωρία των **Ho και Pehlke** [12], [13], [14] που έχει ως εξής:

Κατά την είσοδο του μετάλλου στο καλούπι υπάρχει πολύ καλή μακροσκοπική επαφή εξαιτίας της ρευστότητάς του, ενώ κενά υπάρχουν μόνο σε μικροσκοπική κλίμακα. Η αρχικά πολύ ισχυρή μεταφορά θερμότητας προκαλεί στα προεξέχοντα σημεία τοπική στερεοποίηση εξαιτίας της απότομης ψύξης τους, η οποία αρχίζει να μεταδίδεται στο μεγαλύτερο τμήμα του χυτού. Μέχρις αυτό το σημείο η συνοχή παραμένει ικανοποιητική, και αυτό έως ότου, το χυτό να αναπτύξει ισχυρό στερεοποιημένο μέτωπο, το οποίο λόγω της συνεχούς απόψυξης θα συσταλεί και θα αποκολληθεί από το τοίχωμα του καλουπιού. Επαφή έχουμε πλέον μόνο σε ελάχιστα σημεία που προεξέχουν (σχήμα 2.1) και η ανάλυση του συντελεστή μετάδοσης θερμότητας αναλύεται ως εξής:

$$h_t = h_s + h_c + h_r \quad (2.7)$$

όπου:

h_s = ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας με επαφή (στις προεξοχές)

h_c = ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας με αγωγή μέσω του αέρα του κενού μεταξύ τήγματος και τύπου

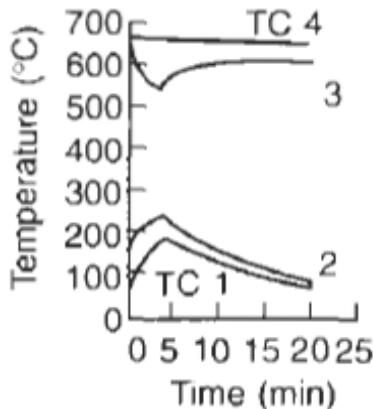
h_r = ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας λόγω ακτινοβολίας

Σχήμα 2 1: α) Τα σημεία επαφής χυτού και καλουπιού και β) Η αύξηση του κενού καθώς ψύχεται και συστέλλεται το τήγμα

Για τα παραπάνω μεγέθη έχουν βρεθεί αναλυτικές εκφράσεις και έχουν ως εξής:

A) Εξαιτίας της αρχικής πολύ καλής επαφής, ο σημαντικότερος παράγοντας είναι η μετάδοση θερμότητας μέσω αγωγής. Ο ολικός συντελεστής h_t παίρνει αρχικά πολύ μεγάλες τιμές που σταδιακά μειώνονται σε φυσιολογικά επίπεδα καθώς χάνεται η συνοχή των δυο επιφανειών. Για παράδειγμα στη χύτευση αλουμινίου υπό πίεση, έχουμε αρχική τιμή $h_t = 60.000 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ και καταλήγει στα $100\text{-}1000 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.

B) Καθώς στερεοποιείται το χυτό και το κενό μεγαλώνει, η μετάδοση θερμότητας μέσω επαφής γίνεται αμελητέα. Το σημείο αυτό φαίνεται και στο διάγραμμα 2.5, όπου ο ρυθμός απόψυξης της επιφάνειας μειώνεται και έχουμε αναθέρμανση.



Διάγραμμα 2 5: Η μείωση του ρυθμού απόψυξης καθώς το κενό χυτού-καλουπιού αυξάνει

Γ) Μετά τη στερεοποίηση η μεταφορά θερμότητας επιτυγχάνεται μέσω του αέρα μεταξύ των δυο επιφανειών και υπολογίζεται ως εξής:

$$h_c = k/d \quad (2.8)$$

όπου:

k = η θερμική αγωγιμότητα του αέρα στο κενό

d = το πάχος του κενού της διεπιφάνειας μετάλλου-καλουπιού.

Τα αποτελέσματα της έρευνας των Ho και Pehlke έδειξαν ότι η συμβολή της ακτινοβολίας στη μετάδοση θερμότητας, για ελαφριά μέταλλα, είναι περίπου 1% της μεταφοράς μέσω του αέρα. Επομένως μπορούμε να τη θεωρήσουμε αμελητέα.

III. Αντίσταση καλουπιού:

Σε περιπτώσεις όπως η χύτευση με άμμο, ο ρυθμός απόψυξης καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από το καλούπι, το οποίο ενεργεί σαν μόνωση, κρατώντας το χυτό σε υψηλή θερμοκρασία για μεγάλο χρονικό διάστημα. Το φαινόμενο αυτό είναι εντονότερο σε καλούπια γύψου ή κεραμικού υλικού. Η υπερβολικά αργή απόψυξη επιδρά αρνητικά στις μηχανικές ιδιότητες του χυτού και για αυτό το λόγο στην περίπτωση της χύτευσης ακριβείας εμβαπτίζουμε τον τύπο σε νερό για μεγαλύτερη αποβολή θερμότητας.

Συμπεράσματα:

Συνοψίζοντας τα παραπάνω μπορούμε να καταλήξουμε στα ακόλουθα για τον συντελεστή μετάδοσης θερμότητας:

1. Η τιμή του δεν είναι σταθερή αλλά μεταβάλλεται συναρτήσει του χρόνου. Επίσης αλλάζει από σημείο σε σημείο του χυτού και επηρεάζεται από το μέταλλο, το υλικό και τη μορφή του τύπου.

2. Η αρχικά μεγάλη τιμή του μειώνεται με το χρόνο σύμφωνα με τη σχέση:

$$h = cf(t)^{-n} \quad (2.9)$$

όπου:

c, n = σταθερές που εξαρτώνται από τη σύσταση του κράματος, το υλικό του καλουπιού και την υπερθέρμανση.

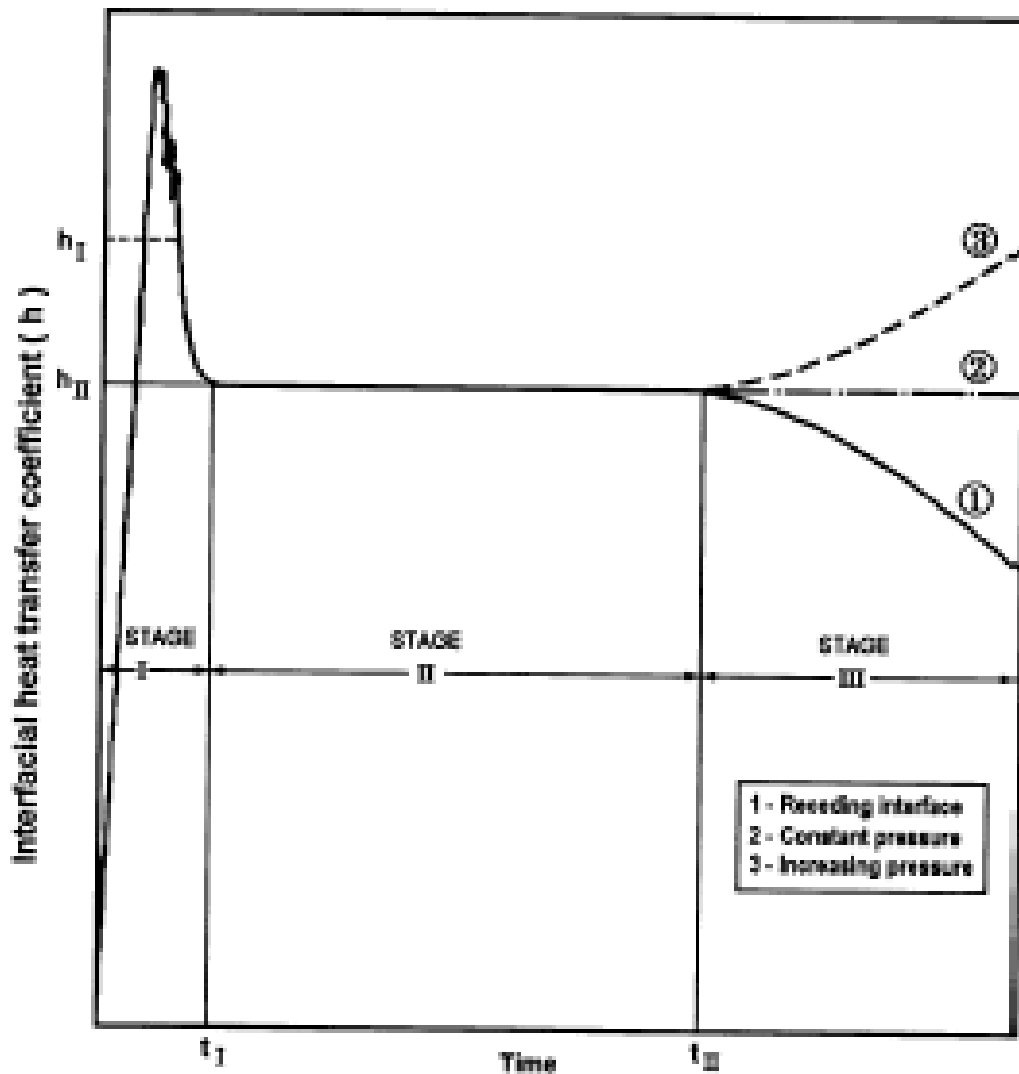
t = ο χρόνος

στη συνέχεια παραμένει σταθερός εξαιτίας του δημιουργούμενου κενού και στο τέλος η τιμή του εξαρτάται από τις οριακές συνθήκες. Διακρίνουμε λοιπόν στο διάγραμμα 2.6 τα ακόλουθα στάδια:

1^ο στάδιο: Υψηλή αρχική τιμή του συντελεστή h, η οποία μειώνεται πολύ γρήγορα.

2^ο στάδιο: Σταθερή τιμή του συντελεστή h για ορισμένο χρονικό διάστημα.

3^ο στάδιο: Ο συντελεστής είτε αυξάνεται (λόγω της αύξησης της πίεσης επαφής στη διεπιφάνεια μετάλλου-καλουπιού, είτε μειώνεται (λόγω αύξησης του κενού της διεπιφάνειας), είτε παραμένει σταθερός (για σταθερή πίεση)



Διάγραμμα 2.6: Τα στάδια της συμπεριφοράς του συντελεστή μετάδοσης θερμότητας

3. Ο συντελεστής h εξαρτάται σημαντικά από τη θερμική διαχυτότητα του καλουπιού όπως φαίνεται και στον Πίνακα 2. Σαν γενικός κανόνας ισχύει ότι μεγάλη διαχυτότητα οδηγεί σε υψηλούς συντελεστές και μικρή διαχυτότητα σε μικρότερους.

Πίνακας 5: Η επίδραση του h από το υλικό του καλουπιού

<i>Material</i>	<i>Heat Diffusivity</i> $(K\rho C)^{1/2}$ $(Jm^{-2} K^{-1}s^{-1/2})$	<i>Thermal Diffusivity</i> $K/\rho C$ (m^2s^{-1})	<i>Heat Capacity</i> <i>per unit volume</i> ρC $(JK^{-1}m^{-3})$
Silica sand	3.21×10^3	3.60×10^{-9}	1.70×10^6
Investment	2.12×10^3	3.17×10^{-9}	1.20×10^6
Plaster	1.8×10^3	3.79×10^{-9}	0.92×10^6
Iron (pure Fe)	16.2×10^3	20.3×10^{-6}	3.94×10^6
Graphite	22.1×10^3	44.1×10^{-6}	3.33×10^6
Aluminium	24.3×10^3	96.1×10^{-6}	2.48×10^6
Copper	37.0×10^3	114.8×10^{-6}	3.60×10^6

Εύρεση συντελεστή μετάδοσης θερμότητας:

Η εύρεση του συντελεστή μετάδοσης θερμότητας μπορεί να πραγματοποιηθεί με δυο τρόπους:

A. τον καθαρά υπολογιστικό-μαθηματικό, που είναι η λύση του αντίστροφου προβλήματος της θερμικής αγωγιμότητας (Inverse heat conduction problem). Η διαδικασία απαιτεί τη γνώση της μεταβολής της θερμοκρασίας σε συγκεκριμένα σημεία του χυτού. Χρειάζεται δηλαδή η εκτέλεση ορισμένων πειραμάτων και μετρήσεις θερμοκρασιών, οπότε στη συνέχεια, με τη βοήθεια αριθμητικών μεθόδων λύνεται το αντίστροφο πρόβλημα θερμικής αγωγιμότητας.

B. τον προσεγγιστικό, που έχει να κάνει με μια σειρά διαδοχικών προσομοιώσεων της διαδικασίας της χύτευσης στον υπολογιστή. Πιο συγκεκριμένα έχοντας μετρήσεις από την εκτέλεση πειραμάτων, συγκρίνουμε τα αποτελέσματα με αυτά των προσομοιώσεων αλλάζοντας ορισμένες παραμέτρους κάθε φορά μέχρι να επιτύχουμε σύγκλιση των τιμών.

2.1.5 Δεδομένα από τη διεθνή βιβλιογραφία για τον υπολογισμό του Σ.Μ.Θ.

Στο παρελθόν έχουν γίνει αρκετές μελέτες για τον προσδιορισμό τόσο μιας συγκεκριμένης τιμής του συντελεστή μετάδοσης θερμότητας, όσο και του γενικότερου προβλήματος της ροής θερμότητας. Οι έρευνες αυτές βασίστηκαν σε μετρήσεις που προέκυψαν από την εκτέλεση πειραμάτων, με χρήση αρκετών κραμάτων και μορφής των χυτών, αλλά και στην υπολογιστική επαλήθευσή τους. Σαν γενική παρατήρηση μπορούμε να διακρίνουμε τη σύγκλιση των αποτελεσμάτων για περιπτώσεις μελέτης κοινού κράματος, αλλά με διαφορετική διάταξη και μέθοδο. Οι σημαντικότερες δημοσιεύσεις που αφορούν στον Σ.Μ.Θ έχουν τα εξής αποτελέσματα:

Οι Ho και Pehlke έκαναν πειράματα για να διερευνήσουν τον συντελεστή μετάδοσης θερμότητας της διεπιφάνειας (IHTC: Interfacial Heat Transfer Coefficient) χυτού αλουμινίου και υδρόψυκτου χάλκινου ψύχοντος σώματος (chill), αλλά σε ένα παχύ τμήμα του χυτού. [12] [13] [14]

Χρησιμοποιώντας μετρήσεις και από το στερεοποιούμενο τήγμα και από το καλούπι και μια μέθοδο αντίστροφης θερμικής αγωγιμότητας (inverse heat conduction method), καθόρισαν τον συντελεστή μεταφοράς θερμότητας της διεπιφάνειας. Η μέθοδος αντίστροφης θερμικής αγωγιμότητας είναι μια πλήρης μαθηματική περιγραφή των φυσικών φαινομένων της διαδικασίας. Με άλλα λόγια είναι η εξίσωση αγωγής θερμότητας, λαμβάνοντας υπόψη και την επίδραση της στερεοποίησης στο μέταλλο. Οι πειραματικές μετρήσεις είναι οι θερμοκρασίες που μετρήθηκαν σε συγκεκριμένες θέσεις. Το αντίστροφο θερμικό πρόβλημα λύνεται προσαρμόζοντας τις παραμέτρους στην μαθηματική περιγραφή ώστε να ελαχιστοποιηθεί η διαφορά ανάμεσα στις τιμές που υπολογίστηκαν για το μοντέλο και τις μετρήσεις. Οι παράμετροι στην μαθηματική περιγραφή είναι οι συντελεστές μεταφοράς θερμότητας (IHTC) σε διαφορετικές χρονικές στιγμές.

Η μελέτη περιελάμβανε και τη διερεύνηση του σχηματισμού κενού (ανάμεσα στα υλικά, λόγω συστολής του τήγματος) και για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκαν δοκιμαστικές διατάξεις που είχαν (α) την ψυχρότερη επιφάνεια πάνω από το τήγμα και (β) την ψυχρότερη επιφάνεια κάτω από το τήγμα.

Το αποτέλεσμα για τον Σ.Μ.Θ ήταν της τάξης των $1000 \text{ W/m}^2\text{K}$. Να σημειωθεί ότι για την ‘κάτω επιφάνεια’ του χυτού, ο Σ.Μ.Θ της διεπιφάνειας έχει μια σύντομη αρχική πτώση και μετά μένει σταθερός.

Επίσης παρόμοια πειράματα, αλλά με διαφορετικό σχήμα χυτού έκαναν και οι Nishida, Droste & Engler [15], καταλήγοντας στην ίδια τιμή για το h .

Σε κοινά αποτελέσματα κατέληξε και η έρευνα του Stafford [16], η οποία όμως ενδιαφέρθηκε κυρίως για την προσομοίωση της χύτευσης ακριβείας με πεπερασμένα στοιχεία και παρατηρήθηκε αύξηση του συντελεστή αντί για μείωσή του με το χρόνο.

Με κοινή πειραματική διάταξη και χρήση θερμοστοιχείων, αλλά με χρήση αντίστροφης ροής θερμότητας, κατέληξαν σε αύξουσα συμπεριφορά του Σ.Μ.Θ και οι Gozlan και Bamberger [17], όπως και οι Kumar και Prahbu [18], χρησιμοποιώντας κράματα αλουμινίου.

Ακόμα, η έρευνα των Krishnan και Sharma [19] που έγινε με χρήση κράματος αλουμινίου-λιθίου σε καλούπι από σίδηρο, έδωσε τιμή για το h της τάξης των $1000 \text{ W/m}^2\text{K}$ με ένα μέγιστο που στη συνέχεια μειώνεται.

Κοινό δεδομένο σε όλες τις παραπάνω εργασίες είναι η χρήση θερμοστοιχείων για τις μετρήσεις. Είτε στη διεπιφάνεια χυτού-καλουπιού είτε σε μικρή απόσταση από αυτή.

Στις έρευνες των T.S. Piwonka, K.A. Woodbury, J.M. Wiest [20] και του Beck [22] γίνεται μελέτη του τρόπου που επηρεάζονται οι θερμοκρασίες του καλουπιού και του χυτού. Κατέληξαν πως όσο πιο όμοιες είναι οι θερμοφυσικές ιδιότητες του υλικού του θερμοστοιχείου και του υλικού του χυτού, τόσο πιο μικρό θα είναι το σφάλμα της μέτρησης. Πιο συγκεκριμένα σε θερμοστοιχείο που η αγωγιμότητα του είναι 10 φορές μεγαλύτερη από αυτή του μετάλλου του χυτού, το σφάλμα μπορεί να φτάσει και τα 100F. Το σφάλμα των μετρήσεων μετρήθηκε και από τους Woodbury K.A, Chen Y, Parker J.K, Piwonka [21] αλλά μέσω προσομοιώσεων, που δείχνουν ότι τα σφάλματα των θερμοστοιχείων είναι σημαντικότερα όταν είναι τοποθετημένα κοντά στη θερμασμένη επιφάνεια. Σφάλματα της τάξης των 80°C , είναι δυνατό να υπάρχουν όταν τα θερμοστοιχεία τοποθετούνται πάνω στην επιφάνεια.

Ενδιαφέρουσα είναι και η έρευνα των Kim και Lee [23] για το h σε σωληνοειδές χυτό, όπου βρήκαν ο Σ.Μ.Θ τα εξωτερικής επιφάνειας πέφτει ή μένει σταθερός, ανάλογα με την επένδυση (coating), ενώ ο συντελεστής της εσωτερικής επιφάνειας μεγαλώνει. Αυτό

αποδόθηκε στη διαστολή του εσωτερικού καλουπιού/πυρήνα, που έχει ως αποτέλεσμα την πολύ σφιχτή συναρμογή των δύο.

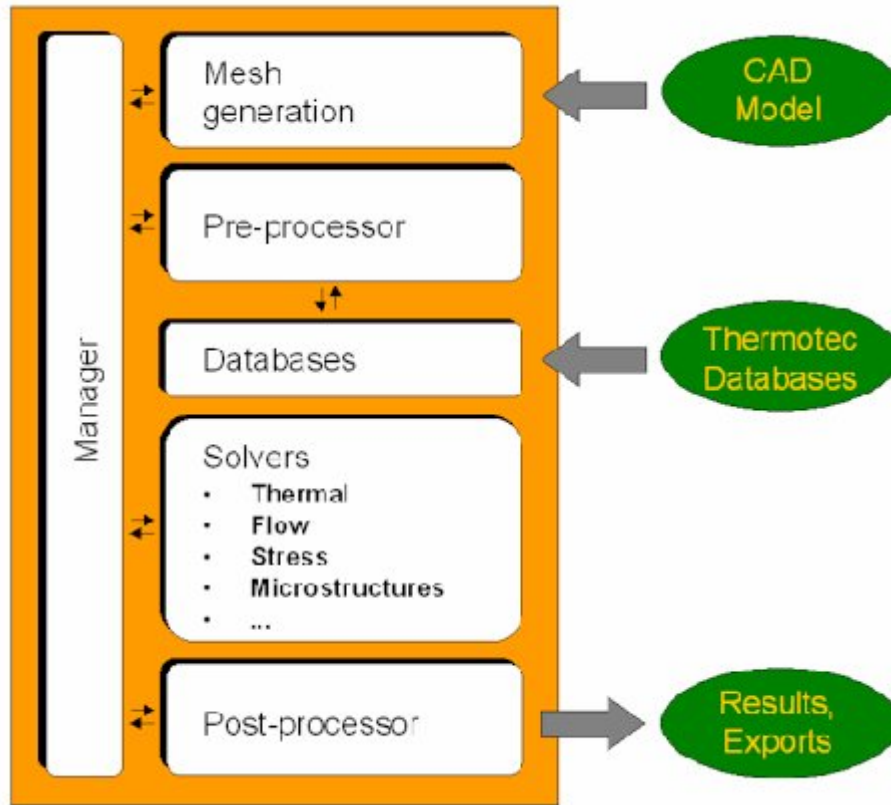
2.2. Προσομοιώσεις

2.2.1. Σύντομη περιγραφή της λογικής και των χαρακτηριστικών του Procast

Το Procast είναι ένα λογισμικό που αναπτύσσεται τα τελευταία 20 χρόνια περίπου και χρησιμοποιεί τη Μέθοδο Πεπερασμένων Στοιχείων για τη μοντελοποίηση διαδικασιών χύτευσης και των φαινομένων που τις συνοδεύουν. Πιο συγκεκριμένα είναι δυνατή η προσομοίωση του μηχανισμού μετάδοσης θερμότητας, της ροής του ρευστού, του τρόπου πλήρωσης το καλουπιού καθώς και στοιχείων της μικροδομής του χυτού, όπως το πορώδες και οι εσωτερικές τάσεις.

Η δομή του προγράμματος βασίζεται γύρω από ένα κύριο διαχειριστή, ο οποίος περιλαμβάνει τα ακόλουθα υποπρογράμματα (modules) :

- MeshCast: όπου δημιουργείται η γεωμετρία του μοντέλου
- PreCast: στο οποίο προσθέτουμε στο μοντέλο, το είδος των υλικών, τις οριακές και συνοριακές συνθήκες
- DataCast: όπου ελέγχεται συνολικά το μοντέλο
- ProCast: στο οποίο γίνεται η επεξεργασία
- ViewCast: απεικονίζει και εξετάζει τα αποτελέσματα



Πιο αναλυτικά για την έκδοση 2004.1 του PROCAST που χρησιμοποιήσαμε, έχουμε τα ακόλουθα:

MeshCast

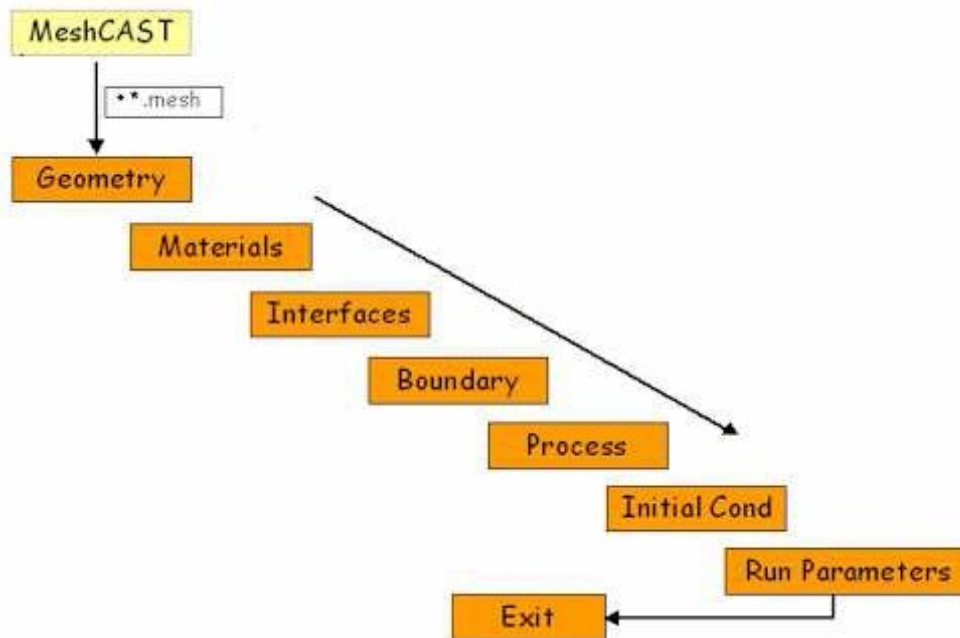
Στο module αυτό γίνεται ορισμός της γεωμετρίας του αντικειμένου που θέλουμε να χυτεύσουμε καθώς και το καλούπι του. Είναι δυνατή η σχεδίαση του με τις εντολές που παρέχει το πρόγραμμα αλλά και η εισαγωγή του κατάλληλου αρχείου που προέρχεται από κάποιο CAD λογισμικό (CATIA, AUTOCAD κτλ). Σε εφαρμογές απλής γεωμετρίας συνηθίζεται η σχεδίαση τους στο MeshCast ενώ για πιο σύνθετες μορφές η σχεδίαση πρέπει να γίνεται σε κατάλληλα προγράμματα και να εισάγονται στο MeshCast για διορθώσεις και πλεγματοποίηση. Σε κάθε περίπτωση, το μοντέλο ελέγχεται για την ύπαρξη σφαλμάτων, το πλήθος των σχηματισμένων επιφανειών και ακμών, ανάλογα με την προκαθορισμένη ακρίβεια.

Αφού ολοκληρωθούν τα παραπάνω βήματα ορίζονται τα επιφανειακά πλέγματα με την επιθυμητή πυκνότητα καθώς και τα ογκικά πλέγματα σε άλλη λειτουργία του MeshCast. Να σημειώσουμε πως ο αριθμός των τετράεδρων που ορίζουν ένα πλέγμα δεν πρέπει να

είναι υπερβολικά μεγάλος καθώς επηρεάζει την ταχύτητα και την ακρίβεια των υπολογισμών.

PreCast

Στο υποπρόγραμμα PreCast ορίζουμε τα υλικά αντικειμένου και καλουπιού, τις αρχικές συνθήκες, τις οριακές συνθήκες και τις παραμέτρους τρεξίματος. Όλα αυτά τα στοιχεία προέρχονται από τις βάσεις δεδομένων του PROCAST και οφείλονται στην καταγραφή των αποτελεσμάτων πειραματικών διαδικασιών.



Η διαδικασία της προ-επεξεργασία έχει ως εξής:

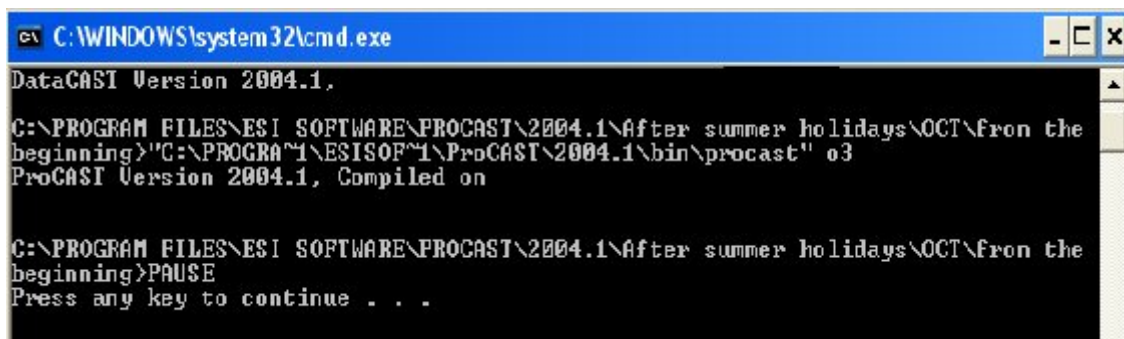
Αρχικά γίνεται επανέλεγχος της γεωμετρίας του μοντέλου και ορίζουμε το κατάλληλο υλικό για το χυτό (χάλυβας, αλουμίνιο, μπρούντζος κτλ) και το καλούπι (άμμος, γύψος κτλ). Κάθε υλικό που επιλέγουμε από τη βάση δεδομένων προσδιορίζεται αναλυτικά με πίνακες και μεγέθη για τις θερμικές, χημικές και μηχανικές του ιδιότητες. Επιπλέον μπορεί ο χρήστης να ορίσει νέο υλικό με τα επιθυμητά χαρακτηριστικά.

Μετά ακολουθεί ο ορισμός του διανύσματος βαρύτητας σε οποιονδήποτε από τους τρεις άξονες και η εισαγωγή των αρχικών και συνοριακών συνθηκών, όπως πίεση χυτού, καλουπιού, διεπιφάνειας, θερμοκρασία. Έπειτα καθορίζουμε τις παραμέτρους τρεξίματος οι οποίες καθορίζουν το συνολικό χρόνο προσομοίωσης, τον αριθμό των βημάτων, τον υπολογισμό πορώδους καθώς και τον τρόπο πλήρωσης του καλουπιού και τον τρόπο

επίλυσης του ροϊκού προβλήματος. Αφού καθορίσουμε όλα τα παραπάνω ανοίγουμε το DataCast.

DataCast

Σκοπός του DataCast είναι η συνολική επισκόπηση του μοντέλου, ο εκτεταμένος έλεγχος σφαλμάτων και η μετατροπή όλων των μονάδων στο πρότυπο CGS. Κατά την εκτέλεση του, εμφανίζει στο παράθυρο ελέγχου την πιθανή ύπαρξη ελαττωμάτων, τα οποία πρέπει να διορθωθούν για να συνεχιστεί η προσομοίωση. Μια ακόμα λειτουργία του DataCast είναι η δημιουργία αρχείων που περιέχουν την περίληψη του προβλήματος και τη γεωμετρία με τις ιδιότητες του μοντέλου.



```
C:\WINDOWS\system32\cmd.exe
DataCAST Version 2004.1,
C:\PROGRAM FILES\ESI SOFTWARE\PROCAS\2004.1\After summer holidays\OCT\from the
beginning>\"C:\PROGRAM FILES\ESI SOFTWARE\PROCAS\2004.1\bin\procast\" o3
ProCAST Version 2004.1, Compiled on
C:\PROGRAM FILES\ESI SOFTWARE\PROCAS\2004.1\After summer holidays\OCT\from the
beginning>PAUSE
Press any key to continue . . .
```

ProCast

Στο module του ProCast γίνονται όλοι οι υπολογισμοί της διαδικασίας της προσομοίωσης, σύμφωνα με τα δεδομένα που έχουμε ορίσει στα προηγούμενα υποπρογράμματα. Επίσης γίνεται η επίλυση του θερμικού και ροϊκού προβλήματος και δημιουργούνται αρχεία αναγνωρίσιμα από το ViewCast. Στο παράθυρο ελέγχου που ανοίγεται φαίνεται αν «τρέχει» η διαδικασία και μόλις ολοκληρωθεί εμφανίζει το ανάλογο μήνυμα. Τέλος στο ProCast περιλαμβάνεται και το υποπρόγραμμα PostCast που επιτρέπει την περαιτέρω επεξεργασία των αποτελεσμάτων.

ViewCast

Στο ViewCast πραγματοποιείται η απεικόνιση των αποτελεσμάτων της διαδικασίας. Η οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων γίνεται είτε με εικόνες, σταδιακά, ανάλογα με τον

αριθμό των εκτελεσμένων βημάτων, είτε με γραφικές παραστάσεις. Οι υπολογισμοί αφορούν τα εξής:

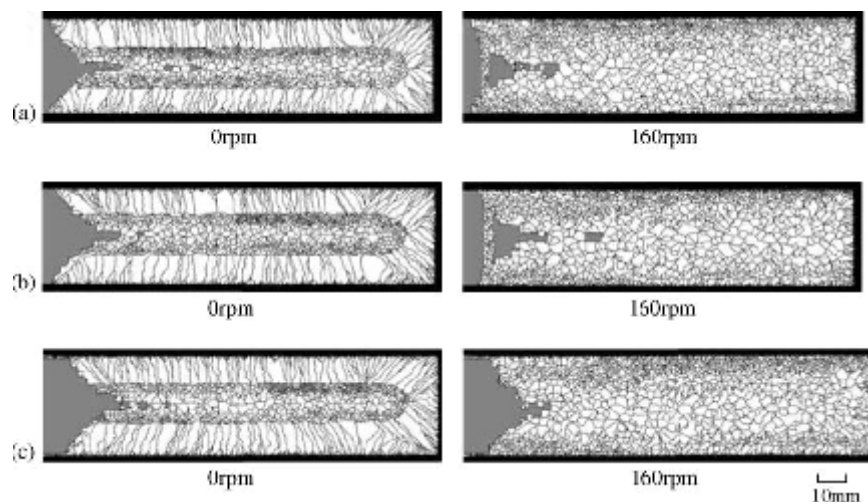
- Τη θερμοκρασία
- Το ποσοστό στερεοποίησης
- Το χρόνο στερεοποίησης
- Το ποσοστό πορώδους
- Τη συνισταμένη ταχύτητα του ρευστού μετάλλου

Status

Τέλος στον manager του PROCAST διακρίνουμε το module Status, το οποίο εμφανίζει την εξέλιξη της διαδικασίας, το χρόνο και τον αριθμό των βημάτων.

2.2.2. Δεδομένα από τη διεθνή βιβλιογραφία για τη φυγοκεντρική χύτευση:

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η μελέτη των W.S. Ping, L.D. Rong, G.J. Jie, L.C Yun, S.Y. Qing, F.H Zhi [23], η οποία με χρήση προσομοιώσεων, εξετάζει την ανάπτυξη της μικροδομής του χυτού, ανάλογα με την ταχύτητα περιστροφής. Θεωρώντας γνωστό το Σ.Μ.Θ από τη βιβλιογραφία, οι ερευνητές κατέληξαν πως το h αυξάνει με την αύξηση της ταχύτητας περιστροφής λόγω ενίσχυσης της αγωγής θερμότητας, που ευνοείται από την καλύτερη διαβροχή του τύπου από το τήγμα. Έτσι αποκτάται μεγαλύτερος ρυθμός τήξης. Η γενική τάση είναι το εμβαδόν της ισοαξονικής ζώνης να αυξάνει με την αύξηση της ταχύτητας περιστροφής. Καθώς αυξάνει η ταχύτητα περιστροφής μεγαλώνει στο τετράγωνο η φυγοκεντρική δύναμη, γεγονός που δημιουργεί ισχυρή αγωγή στο υγρό, προκαλώντας γρηγορότερη ομογενοποίηση της θερμοκρασίας του τήγματος. Για το λόγο αυτό είναι διαφορετική η ανάπτυξη της μικροδομής στις 0rpm και διαφορετική στις 160rpm, ανάλογα και με τη θερμοκρασία καλουπιού. Τα παραπάνω διακρίνονται και στα παρακάτω σχήματα:



Εικόνα 2 19: Η ανάπτυξη της ισοαξονικής ζώνης στις 0rpm και 160rpm, σε θερμοκρασία a)1°C b)50°C και c)150°C.

Στη μελέτη των G. Chirita, D.Soaere και F.S Silva [24] παρουσιάζεται η σύγκριση των μηχανικών ιδιοτήτων χυτών που κατασκευάστηκαν με τη μέθοδο της βαρύτητας και της φυγοκεντρικής χύτευσης. Το κράμα που χρησιμοποιήθηκε ήταν Al-Si και παρατηρήθηκε αύξηση 160% στην αντοχή σε εφελκυσμό και 1500 % στην αντοχή σε κόπωση, για τα χυτά της φυγοκεντρικής χύτευσης.

Στη δημοσίευση των P.X Fu, X.H. Kang, Y.C Ma, K. Lin, D.Z. Li και Y.Y Li [25] γίνεται μελέτη της επίδρασης που έχουν στην απόψυξη του χυτού βασικοί παράμετροι της χύτευσης, όπως η αρχική θερμοκρασία τήγματος, καλουπιού και η ταχύτητα περιστροφής της μηχανής. Το χυτό που παρασκευάστηκε ήταν βαλβίδα εξαγωγής M.E.K από κράμα τιτανίου. Πιο συγκεκριμένα για τιμές αναφοράς πήραν τις ακόλουθες:

Αρχική θερμοκρασία μετάλλου: 1690 °C

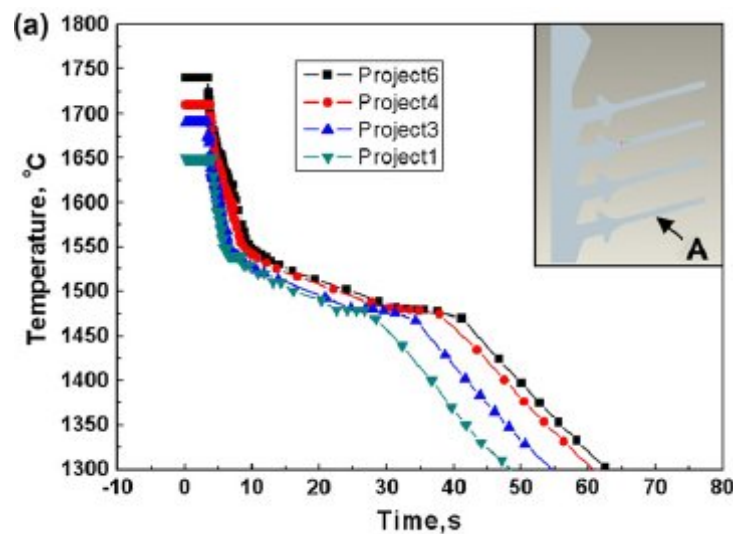
Αρχική θερμοκρασία τύπου: 900 °C

Ταχύτητα περιστροφής: 450 rpm

Αλλάζοντας τα αρχικά δεδομένα σύμφωνα με τον ακόλουθο πίνακα (Πίν. 6), είχαν τα αποτελέσματα του Διαγράμματος 2.2.

Πίνακας 6: Αρχικές συνθήκες φυγοκεντρικής χύτευσης για της παρασκευή βαλβίδων εξαγωγής M.E.K

Simulation project	Project 1	Project 2	Project 3	Project 4	Project 5	Project 6
Pouring temperature (°C)	1650	1690	1690	1710	1730	1740
Filling times (s)	7	6	7	7	7	7
Mould temperature (°C)	800	900	900	950	950	950
Rotation speed (rpm)	400	450	400	400	400	420



Διάγραμμα 2 2: Η επίδραση των αρχικών συνθηκών, στην απόψυξη του χυτού από κράμα τιτανίου.

Στη δημοσίευση των Wu M, Augthun M, SchaEdlich-Stubenrauch J, Sahm PR, Spiekermann H [26], μελετάται μέσω προσομοιώσεων και πειραμάτων, το πορώδες σε

οδοντικά πρόσθετα, που κατασκευάστηκαν με φυγοκεντρική χύτευση, από κράμα τιτανίου. Πιο συγκεκριμένα μεταβάλλοντας την αρχική θερμοκρασία καλουπιού και τη θέση της θύρας τροφοδοσίας τήγματος, κατέληξαν στο συμπέρασμα πως είναι δυνατή η πρόβλεψη του σημείου εμφάνισης του μεγαλύτερου ποσοστού πορώδους με την κατάλληλη σχεδίαση του μοντέλου προσομοίωσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

- 3.1.** Υλικά Χύτευσης (ορείχαλκος CuZn30 - ιδιότητες)
- 3.2.** Εξοπλισμός Χύτευσης
 - 3.2.1.** Μηχανή χύτευσης με βαρύτητα
 - 3.2.2.** Φυγοκεντρική χυτόπρεσσα
- 3.3.** Εξοπλισμός λήψης μετρήσεων θερμοκρασίας
- 3.4.** Εξοπλισμός Μελέτης Μικροδομής

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

3.1. Υλικά Χύτευσης (Ορείχαλκος - Ιδιότητες)

Προκειμένου να κατασκευαστεί ένα μεταλλικό προϊόν, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η προσαρμογή των φυσικών, των χημικών και των μηχανικών ιδιοτήτων του, στις συνθήκες κατεργασίας του τεμαχίου. Η κατεργασία οφείλει να γίνεται με οικονομική και εύκολη μέθοδο. Συχνά, όμως, είναι αναπόφευκτοι κάποιοι συμβιβασμοί, αφού η μορφή του μετάλλου είναι πιθανό να εμποδίζει την επιλογή της κατάλληλης διαδικασίας κατασκευής ή το αντίθετο.

Για την περάτωση της πειραματικής διαδικασίας το κράμα που χρησιμοποιήθηκε ήταν ο Ορείχαλκος Cu70Zn30, που προμηθευτήκαμε από το εμπόριο.

Ο Ορείχαλκος (Cu-Zn) περιλαμβάνει όλα τα κράματα με κύρια συστατικά το χαλκό και τον ψευδάργυρο και έχοντας σαν προσμίξεις μικρές ποσότητες μόλυβδου, κασσιτέρου και μαγγανίου. Οι ιδιότητες του παρουσιάζονται αναλυτικότερα στη συνέχεια.

Για την εξυπηρέτηση τόσο των κατασκευαστών όσο και των καταναλωτών οι οργανώσεις χυτών του εξωτερικού, έχουν εκδώσει πίνακες λεπτομερούς ταξινόμησης των διαφόρων κραμάτων χαλκού και των εφαρμογών τους. Τα κράματα χαλκού χρησιμοποιούνται ευρέως στην κατασκευή ηλεκτρικών αγωγών, στην υδραυλική βιομηχανία και πολλές φορές για διακοσμητικούς σκοπούς. Ο χαλκός γενικά έχει ικανοποιητική αντοχή και σκληρότητα αλλά δε διαθέτει μεγάλη αντοχή σε διάβρωση ενώ οι μπρούντζοι και οι ορείχαλκοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για εφαρμογές σε θαλάσσιο περιβάλλον και στην κατασκευή μετάλλων τριβής.

Εικόνα 3. 1 Έλικο tanker κατασκευασμένη από κράμα χαλκού, διαμέτρου 7.5 m

Εικόνα 3. 2 Διάφορα τεμάχια από ορείχαλκο και μπρούντζο παραχθέντα με τη μέθοδο συνεχούς χύτευσης

Κράματα Cu-Zn (Ορείχαλκοι) [1]:

Οι ορείχαλκοι αποτελούν κράματα Cu-Zn, στα οποία το ποσοστό ψευδαργύρου, στην πράξη, δεν υπερβαίνει το 45% μπορεί, όμως, θεωρητικά να φθάσει και το 68%. Στο Σχήμα 3.1, παρουσιάζεται το διάγραμμα ισορροπίας των φάσεων Cu-Zn.

Σχήμα 3.1: Διάγραμμα ισορροπίας των φάσεων του διμερούς κράματος Cu-Zn

Για ποσοστά ψευδαργύρου μέχρι 39% κ.β (μέγιστη διαλυτότητα στους 454°C), σχηματίζεται στερεό διάλυμα φάσης α. η φάση α κρυσταλλώνεται στο κυβικό εδρωκεντρωμένο σύστημα και ο μονοφασικός ορείχαλκος φάσης α παρουσιάζει καλή ολκιμότητα εν ψυχρώ.

Για ποσοστά ψευδαργύρου 46-51% και θερμοκρασία υψηλότερη των 454°C, σχηματίζεται η φάση β, του κυβικού χωροκεντρωμένου συστήματος, η οποία σε χαμηλότερες θερμοκρασίες μετασχηματίζεται σε φάση β'.

Η φάση β έχει καλή ολκιμότητα εν θερμώ, ενώ η β' είναι σκληρή και εύθραυστη. Όταν το ποσοστό ψευδαργύρου κυμαίνεται μεταξύ 56% και 68%, σχηματίζεται η φάση γ, η οποία είναι εξαιρετικά εύθραυστη.

Πρακτική χρησιμότητα έχουν δυο είδη ορείχαλκου: μονοφασικός ορείχαλκος φάσης α (με 5-39%Zn) και διφασικός α+β' (με 40-50% Zn). Ορείχαλκοι αμιγούς φάσης β και διφασικοί β+γ δεν βρίσκουν εφαρμογές, λόγω της ευθραυστότητάς τους.

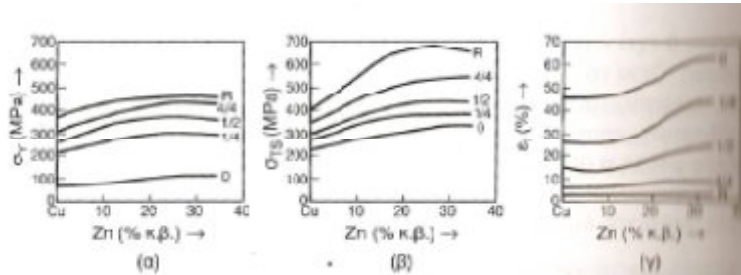
Γενικά, οι ιδιότητες των ορειχάλκων μεταβάλλονται κατά συνεχή τρόπο, με την αύξηση της περιεκτικότητας του Zn.

Αυξανόμενου του ποσοστού σε Zn, το χρώμα των ορειχάλκων μεταβάλλεται από κόκκινο σε κίτρινο, ενώ η ηλεκτρική τους αγωγιμότητα ελαττώνεται, γεγονός που τους καθιστά ακατάλληλους για ηλεκτρικές εφαρμογές.

Επίσης με την αύξηση της περιεκτικότητας σε Zn αυξάνεται η σκληρότητα και η ολκιμότητα, για ορείχαλκο με περιεκτικότητα σε Zn μέχρι 28-30%. Με περαιτέρω αύξηση της περιεκτικότητας σε ψευδάργυρο η σκληρότητα ελαττώνεται, ενώ η ολκιμότητα συνεχίζει αυξανόμενη.

Στο σχήμα 3.2, παρουσιάζονται οι μεταβολές των μηχανικών ιδιοτήτων των μονοφασικών ορειχάλκων, για διάφορα ποσοστά ενδοτράχυνσης, συναρτήσει της

περιεκτικότητας τους σε ψευδάργυρο. Παρατηρείται ότι οι μέγιστες τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων εμφανίζονται στον ορείχαλκο που περιέχει 30%Zn. Το κράμα αυτό διαθέτει άριστη συμπεριφορά κατά κοίλανση.



Σχήμα 3.2: Μεταβολή α) του ορίου διαρροής, β) της αντοχής σε εφελκυσμό και γ) της επιμήκυνσης θραύσης, των μονοφασικών ορειχάλκων, συναρτήσει της περιεκτικότητας τους σε ψευδάργυρο, για διάφορα ποσοστά ενδοτράχυνσης.

Γενικά, οι ορείχαλκοι παρουσιάζουν αντοχή σε διάβρωση, σε διάφορα είδη διαβρωτικού περιβάλλοντος. Η αντοχή σε διάβρωση των ορειχάλκων βελτιώνεται με την προσθήκη 1% Sn ή Al (π.χ το κράμα Cu-22% Zn-2% Al). Επιπλέον αντιδιαβρωτική προστασία τους επιτυγχάνεται με τη δημιουργία προστατευτικών ηλεκτρολυτικών επικαλύψεων από Ni, Cr ή Au.

Οι ορείχαλκοι που περιέχουν ψευδάργυρο σε ποσοστό μεγαλύτερο από 10%, εμφανίζουν το φαινόμενο της εργοδιάβρωσης; Όταν ορείχαλκος βρίσκεται υπό καθεστώς τάσεων, διαβρώνονται τα όρια των κόκκων (περικρυσταλλική διάβρωση) από την υγρασία της ατμόσφαιρας, σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Οι τάσεις αυτές μπορεί να προέρχονται είτε από εξωτερική καταπόνηση, είτε από ενδοτράχυνση του κράματος. Η διάβρωση είναι ταχύτερη στην περίπτωση αμμωνιακής ατμόσφαιρας ή ατμόσφαιρας αλάτων υδραργύρου. Ονομάζεται και εποχιακή ρωγμάτωση, διότι παρατηρείται σε εποχές μεγάλης υγρασίας. Η εργοδιάβρωση αντιμετωπίζεται εάν ο ορείχαλκος μετά την διαμόρφωση του ανοπτηθεί σε θερμοκρασία 275°C, για μισή ώρα, ώστε να ελαττωθούν οι εσωτερικές τάσεις από ενδοτράχυνση, χωρίς ταυτόχρονη μείωση της σκληρότητας του κράματος.

Οι α-ορείχαλκοι διαμορφώνονται εύκολα εν ψυχρώ και δυσκολότερα εν θερμώ. Οι ορείχαλκοι α+β, διαμορφώνονται εύκολα εν θερμώ (700-750°C), διότι σε υψηλές θερμοκρασίες η εύθραυστη φάση β', μετασχηματίζεται στην όλκιμη φάση β. γενικά η

μορφοποίηση των μονοφασικών ορειχάλκων γίνεται εν ψυχρώ, με ενδιάμεσες, ανοπτήσεις, ενώ των διφασικών γίνεται εν θερμώ.

Στην περίπτωση που ένα έλασμα ορείχαλκου πρόκειται να υποστεί βαθεία κοίλανση, θα πρέπει να ελεγχθεί το μέγεθος των κόκκων του. Πολύ λεπτόκοκκο κράμα διαμορφώνεται δύσκολα, ενώ χονδρόκοκκο κράμα, μετά από βαθεία κοίλανση, αποκτά ανώμαλη εξωτερική επιφάνεια, η οποία καλείται «δέρμα πορτοκαλιού». Η ρύθμιση του μεγέθους των κόκκων, μετά την εν ψυχρώ έλαση, γίνεται με ανακρυστάλλωση του κράματος σε θερμοκρασία 600-700°C, για μισή περίπου ώρα.

Το συχνότερα χρησιμοποιούμενο διφασικό κράμα είναι το κράμα του MUNTZ, το οποίο περιέχει 40% Zn, είναι σκληρό και μη όλκιμο, λόγω της ύπαρξης της φάσης β'. Το κράμα αυτό μορφοποιείται εύκολα σε υψηλές θερμοκρασίες, ενώ η κατεργασιμότητά του βελτιώνεται με την προσθήκη Pb, σε ποσοστό 0,4-3%. Ο μόλυβδος δεν σχηματίζει στερεό διάλυμα με το χαλκό, αλλά βρίσκεται διασκορπισμένος, σε σφαιρική μορφή, στη μάζα του ορειχάλκου, γεγονός που διευκολύνει τον τεμαχισμό των αποβλήτων της κοπής, μειώνοντας έτσι τη φθορά τόσο του κοπτικού εργαλείου όσο του αντικειμένου. Στο Σχήμα 3.3, φαίνεται χαρακτηριστική δομή τέτοιου κράματος.

Σχήμα 3.3 : Μικροδομή ορείχαλκου MUNTZ (60%Cu-40%Zn) α) χωρίς και β) μετά από θερμική κατεργασία

3.2. ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΧΥΤΕΥΣΗΣ

3.2.1. Μηχανή Χύτευσης με βαρύτητα

3.2.1.1 Χρησιμοποιούμενα μέσα

Για την εκτέλεση των πειραμάτων στη χυτόπρεσα βαρύτητας, ήταν απαραίτητα τα ακόλουθα μηχανήματα:

- Λαστιχέρα
- Κερίερα
- Εξαερωτής
- Αποκερωτής
- Φούρνος ψησίματος
- Χυτόπρεσα βαρύτητας με υποβοήθηση κενού

Εικόνα 3. 3 Λαστιχέρα

Εικόνα 3. 4 Κερίερα

Εικόνα 3. 5 Εξαερωτής

Εικόνα 3. 6 Φούρνος αποκέρωσης

Εικόνα 3. 7 Ο Φούρνος ψησίματος

Εικόνα 3. 8 Η χυτόπρεσα βαρύτητας

Επίσης χρησιμοποιήσαμε και τα παρακάτω εργαλεία:

- Φλάσκα με λαστιχένια βάση και προστατευτικό κολάρο
- Κοπίδι
- Κόφτη
- Ψαλίδι για το κόψιμο των λωρίδων μετάλλου
- Μπολ ανάμιξης και αναμικτήρας
- Ηλεκτρικό κολλητήρι

Εικόνα 3. 9 Η φλάσκα και η λαστιχένια βάση

Εικόνα 3. 10 Το μπολ ανάμιξης

Εικόνα 3. 11 Το κοπίδι, ο κόφτης και το ψαλίδι

Εικόνα 3. 12 Το κολλητήρι

3.2.1.1. Πειραματική διαδικασία:

Η περάτωση ενός πειράματος με τη μέθοδο της χύτευσης ακριβείας απαιτεί την εκτέλεση συγκεκριμένων βημάτων, δίνοντας προσοχή σε κάθε ένα αφού όλα είναι σημαντικά για το σωστό αποτέλεσμα. Έτσι έχουμε:

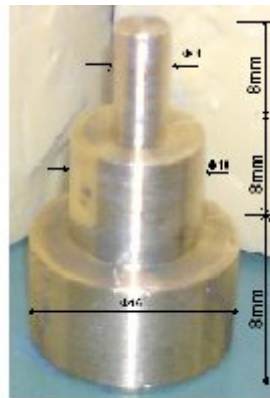
- I. Κατασκευή του αρχικού προτύπου
- II. Κατασκευή του λαστιγένιου καλουπιού
- III. Κατασκευή των κέρινων ομοιωμάτων
- IV. Συναρμολόγηση των κέρινων ομοιωμάτων για τη δημιουργία του δέντρου χύτευσης
- V. Πλήρωση του μούφλου με γύψο
- VI. Αποκέρωση
- VII. Ψήσιμο της φλάσκας
- VIII. Λιώσιμο του μετάλλου
- IX. Έγχυση του ρευστού μετάλλου στο θερμό καλούπι
- X. Απομάκρυνση του γύψινου καλουπιού
- XI. Παραλαβή των χυτών

Για κάθε βήμα ξεχωριστά έχουμε:

- I. Κατασκευή του αρχικού προτύπου:

Όπως αναφέρεται και στο θεωρητικό τμήμα της εργασίας, είναι απαραίτητη η κατασκευή ενός αρχικού προτύπου, στο επιθυμητό σχήμα, που λαμβάνει υπόψη τις προβλεπόμενες μεταβολές στις διαστάσεις λόγω συρρίκνωσης του μετάλλου. Το στάδιο αυτό είναι σημαντικό αφού επηρεάζει όλα τα επόμενα και για αυτό ο τεχνίτης που αναλαμβάνει την κατασκευή του πρέπει να είναι αρκετά έμπειρος. Το υλικό που επιλέγεται είναι συνήθως κάποιο φθηνό και εύκολα επεξεργάσιμο μέταλλο, ενώ σε σπάνιες περιπτώσεις μπορεί να χρησιμοποιηθεί καθαρός άργυρος ή ασήμι Sterling. Στην περίπτωση μας το πρότυπο κατασκευάστηκε από ορείχαλκο με τη χρήση τόννου. Το σχήμα του ήταν κυλινδρικό, αποτελούμενο από τρεις διαφορετικές διατομές με διαστάσεις που φαίνονται στην εικόνα 3.14.

Εναλλακτικά η δημιουργία του προτύπου θα μπορούσε να γίνει χειρονακτικά με χρήση κεριού ή με τη μέθοδο ταχείας προτυποποίησης με τη βοήθεια υπολογιστικών πακέτων CAD.



Εικόνα 3. 13 Το αρχικό πρότυπο και οι διαστάσεις του

Η επιλογή του σχήματος και των διαστάσεων έγινε αφενός για λειτουργικούς λόγους, ώστε να χωράνε τα πρότυπα στη φλάσκα και αφετέρου επειδή είναι ένα απλό γεωμετρικό σχήμα που βοηθά να διαπιστωθούν πειραματικά τα πλεονεκτήματα της χύτευσης ακριβείας (διαστασιολογική ακρίβεια, ποιότητα επιφάνειας χυτών κτλ), αλλά και να μελετηθεί το πώς επηρεάζεται η διαδικασία στερεοποίησης ανάλογα με τη διατομή του προτύπου.

Το μέγεθος και η θέση του δευτερεύοντος αγωγού τροφοδοσίας επιλέχθηκαν να είναι τέτοια που να εξασφαλίζουν τη σωστή πλήρωση των κοιλοτήτων και να αποφεύγονται ελαττώματα ή αστοχίες των αντικειμένων.

II. Κατασκευή λαστιχένιου καλουπιού:

Η εκτέλεση του βήματος αυτού είναι αρκετά δύσκολη και πρέπει να γίνεται έχοντας κατά νου, πως οποιαδήποτε ατέλεια του προτύπου αναπαράγεται από το λαστιχένιο καλούπι και επομένως από το κέρνιο ομοίωμα. Έτσι και το τελικό αντικείμενο θα έχει τα ίδια ελαττώματα και φτωχές επιφανειακές ιδιότητες. Υπάρχουν πολλά είδη λάστιχων με διάφορες διαβαθμίσεις στη σκληρότητα, στη σύσταση τους (φυσικά ή τεχνητά) και στη θερμοκρασία τήξης τους. Ανάλογα με τις ιδιότητες που διαθέτουν παράγονται και τα ανάλογα κέρνινα πρότυπα. Από τους πιο συχνά χρησιμοποιούμενους τύπους, είναι το λάστιχο σιλικόνης που παρέχει καλή ποιότητα κέρνινων προτύπων και εύκολη απομάκρυνσή τους.

Τα λάστιχο που χρησιμοποιήσαμε στη χύτευση βαρύτητας ήταν της εταιρείας CASTALDO κίτρινου χρώματος και η διαδικασία που ακολουθήσαμε ήταν η εξής:

a) Στο παντέφι, το οποίο χρησιμοποιείται για τη σύσφιξη του λαστιχένιου καλουπιού και το οποίο έχουμε πρώτα συναρμολογήσει, τοποθετούμε την πρώτη μεταλλική πλάκα και δυο στρώσεις λάστιχου στις διαστάσεις που απαιτούνται. Ακουμπάμε το μεταλλικό πρότυπο πιέζοντάς το ελαφρά ώστε να εισχωρήσει μερικώς στο λάστιχο. Αν χρειάζεται τοποθετούμε και τον μεταλλικό κορμό που θα αποτυπώσει τον δευτερεύοντα αγωγό τροφοδοσίας, συνδέοντας το χυτό με τον κύριο αγωγό. Αν δεν τον αποτυπώσουμε θα ανοίξουμε χειρονακτικά έναν, κόβοντας το λαστιχένιο καλούπι.

Εικόνα 3. 14 Το πρότυπο και ο δευτερεύων αγωγός τροφοδοσίας, πάνω στις πρώτες στρώσεις λάστιχου (μέσα στο παντέφι)

b) Τοποθετούμε άλλες δυο στρώσεις λάστιχου πάνω από το πρότυπο και τη δεύτερη μεταλλική πλάκα που θα προδώσει την απαιτούμενη πίεση.

c) Βάζουμε το παντέφι στη λαστιχέρα, το πιέζουμε μέχρι να στερεωθεί και το θερμαίνουμε σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή του λάστιχου. Έτσι το λάστιχο θα ρευστοποιηθεί ελεγχόμενα, αφού περικλείεται από το παντέφι, αποτυπώνοντας με ακρίβεια οποιαδήποτε λεπτομέρεια του προτύπου. Για το είδος λάστιχου που χρησιμοποιήσαμε οι οδηγίες θέρμανσης ήταν αυτές του πίνακα 3.1.

Πίνακας 3. 1 Η θερμοκρασία και ο χρόνος ψησίματος του λάστιχου

Θερμοκρασία Λαστιγιέρας	Χρόνος Ψησίματος
88°C	30 min
82°C	45min
76°C	60min
71°C	90min

d) Μόλις ολοκληρωθεί ο κύκλος θέρμανσης, απομακρύνουμε το παντέφι που περικλείει το συμπαγές λάστιχο με το πρότυπο που πρέπει να αφαιρέσουμε. Να σημειώσουμε πως για την εύκολη αποσυναρμολόγηση του παντεφιού γίνεται ο ψεκασμός του με λιπαντικό σπρέι πριν την τοποθέτηση του λάστιχου.

e) Η αφαίρεση του μεταλλικού προτύπου γίνεται κόβοντας με ψαλίδι και κοπίδι το λάστιχο προσέχοντας να μην το φθείρουμε, γιατί θα χρησιμοποιηθεί και σε άλλες προτυποποιήσεις. Τα δύο τεμάχια λάστιχου που θα προκύψουν πρέπει να διαθέτουν ίδιο πάχος για να έχουμε αργότερα καλύτερη πλήρωση της σχηματισμένης κοιλότητας με κερί. Αν χρειάζεται στο σημείο αυτό γίνεται και η διάνοιξη του δευτερεύοντος αγωγού τροφοδοσίας.

Εικόνα 3. 15 Τα δύο τμήματα του λαστιχένιου καλουπιού, μετά το κόψιμό του, διακρίνεται η απουσία δευτερεύοντος αγωγού τροφοδοσίας

III. Κατασκευή κέρινων ομοιωμάτων:

Το στάδιο αυτό περιλαμβάνει την τήξη κεριού και την έγχυσή του στην σχηματισμένη κοιλότητα του λαστιχένιου καλουπιού. Η διαδικασία αυτή γίνεται με την κεριέρα. Το χρησιμοποιούμενο είδος κεριού πρέπει να διαθέτει την κατάλληλη σκληρότητα που να το βοηθά να αναπαράγει πιστά τις λεπτομέρειες του προτύπου. Πρέπει, επίσης, να μπορεί να απομακρύνεται εύκολα χωρίς να σπάει. Οι δυο αυτές ιδιότητες είναι δύσκολο να συνδυαστούν και για αυτό υπάρχουν τα κεριά γενικής χρήσης και τα οποία χρησιμοποιήσαμε. Πιο συγκεκριμένα τα κέρινα ομοιώματα

κατασκευάστηκαν από μπλε κερί της εταιρίας Castaldo με σημείο τήξης τους 78°C και σύμφωνα με την εξής διαδικασία:

a) Τοποθετούμε το κερί που βρίσκεται υπό τη μορφή μικρών σφαιρών στο δοχείο τήξης της κεριέρας ρυθμίζοντας τη θερμοκρασία και την πίεση του, από τα ανάλογα όργανα.

b) Μόλις λιώσει το κερί φέρνουμε το λαστιχένιο καλούπι μπροστά από το στόμιο έγχυσης και πιέζοντας το, γεμίζει το σχηματισμένο αποτύπωμα. Για ομοιόμορφη πλήρωση σφίγγουμε το καλούπι με δυο μεταλλικές πλάκες στις δυο του πλευρές.

Εικόνα 3. 16 Η έγχυση του κεριού στο λαστιχένιο καλούπι

c) Περιμένουμε μερικά λεπτά να στερεοποιηθεί το κερί και ανοίγουμε το λαστιχένιο καλούπι, απομακρύνοντας προσεχτικά το σχηματισμένο ομοίωμα. Την διαδικασία επαναλαμβάνουμε όσες φορές επιθυμούμε για την κατασκευή κέρινων ομοιωμάτων.

Εικόνα 3. 17 Το σχηματισμένο κέρινο ομοίωμα, μαζί με τον δευτερεύοντα αγωγό τροφοδοσίας

Τέλος πρέπει να δίνουμε προσοχή στα υπολείμματα που αφήνουν τα κεριά κατά την απομάκρυνσή τους καθώς και στον καθαρισμό των λαστιχένιων καλουπιών, για την αποφυγή αναπαραγωγής ατελειών κατά την έγχυση του κεριού.

IV. Κατασκευή και συναρμολόγηση του δέντρου χύτευσης:

Αφού έχουμε τον επιθυμητό αριθμό των κέρινων ομοιωμάτων, γίνεται η κατασκευή του δέντρου χύτευσης, που στην περίπτωση μας ήταν σχετικά απλή λόγω των λίγων τεμαχίων που το αποτελούσαν. Για τη σωστή συναρμολόγηση πρέπει να προσέξουμε μερικές λεπτομέρειες. Καταρχάς δεν ενδείκνυται η τοποθέτηση ανόμοιων αντικειμένων, λόγω ανομοιογένειας στην απαιτούμενη ποσότητα μετάλλου που απαιτεί το καθένα και άρα διαφορετικού χρόνου στερεοποίησης, που πιθανόν να εμποδίσει τη ροή τήγματος σε άλλα σημεία. Σε περιπτώσεις που δε μπορούμε να αποφύγουμε αυτήν την επιλογή, φροντίζουμε να τοποθετήσουμε τα βαρύτερα αντικείμενα κοντά στο κάτω μέρος του δέντρου και τον κύριο αγωγό. Ακόμα, δεν συνιστάται η πολύ κοντινή

τοποθέτηση των ομοιωμάτων, αφού το πάχος του γύψου στο σημείο αυτό θα είναι μικρό, επιτρέποντας την απότομη αύξηση της θερμοκρασίας του μόλις εισέλθει το τήγμα, προκαλώντας έτσι πόρους στο χυτό. Επίσης σημαντική είναι η γωνία συγκόλλησης των ομοιωμάτων σε σχέση με τον κύριο αγωγό, με την ιδανική να βρίσκεται περίπου στις 40-50°. Προσέχουμε ακόμα, τα δύο τεμάχια να βρίσκονται αντιδιαμετρικά του κεντρικού αγωγού για να εξασφαλιστεί ομοιόμορφη πλήρωση τους και αποφυγή έντονης συρρίκνωσης.

Σημαντικό σημείο προσοχής είναι και η ομαλή ένωση του δευτερεύοντος αγωγού στον κεντρικό, που πρέπει να είναι λεία χωρίς απότομες γωνίες και κενά. Η συγκόλληση γίνεται θερμαίνοντας τοπικά το σημείο ένωσης με τη βοήθεια κολλητηριού. Τέλος, να προσθέσουμε πως το κερί που χρησιμοποιούμε για τον κεντρικό αγωγό είναι διαφορετικής ποιότητας (διαφορετικού σημείου τήξης) από αυτό που κατασκευάσαμε τα ομοιώματα. Έτσι, εφ' όσον ο κύριος αγωγός τήκεται σε μικρότερη θερμοκρασία από αυτήν των ομοιωμάτων, απορρέει γρηγορότερα, ελευθερώνοντας χώρο για το λιώσιμο τους.

Το δέντρο που κατασκευάσαμε ήταν δύο κλάδων με ένα τεμάχιο σε κάθε ένα, σε γωνία 45° με τον κεντρικό αγωγό.

Εικόνα 3. 18 Το δέντρο χύτευσης για τη μέθοδο βαρύτητας.

V. Γέμισμα του μούφλου με γύψο:

Όταν ετοιμαστεί το δέντρο χύτευσης πάνω στη λαστιχένια βάση, τοποθετούμε τη μεταλλική φλάσκα με το λαστιχένιο κολάρο το οποίο δεν επιτρέπει τη διαφυγή του υγρού γύψου από τις τρύπες της φλάσκας. Τα βήματα για το γέμισμα περιγράφονται ακολούθως:

a) Παρασκευή του ρευστού γύψου:

Χρειαζόμαστε την ποσότητα τόσο του γύψου που διαθέτουμε σε μορφή σκόνης όσο και του απιονισμένου νερού που απαιτείται για το μίγμα. Για αυτό υπολογίζουμε τις διαστάσεις και τον όγκο του μούφλου, οι οποίες είναι:

Διάμετρος: $d=10.2 \text{ cm}$

Ύψος: $h=20.3 \text{ cm}$

Όγκος: $V=1658 \text{ cm}^3$

Ο γύψος που χρησιμοποιήσαμε ήταν της εταιρείας Ransom & Randolph τύπου Ultra Vest με την ακόλουθη αναλογία:

Μάζα σκόνης γύψου: 1580 gr

Όγκος νερού: 630ml

Στη συνέχεια ακολουθεί η ανάμιξη των δυο συστατικών στο ειδικό μπολ. Αρχικά ρίχνουμε το νερό και προσθέτουμε σταδιακά το γύψο αναμιγνύοντας με το χέρι για 3-4 min μέχρις ότου το μίγμα να γίνει ομοιογενές και ρευστό. Έπειτα πρέπει να γίνει απαέρωση του μίγματος για την απελευθέρωση των εγκλωβισμένων ποσοτήτων αέρα στο εσωτερικό του. Η απαέρωση διαρκεί περίπου 1,5-2 min χτυπώντας ελαφρά τη βάση του απαερωτή.

Εικόνα 3. 19 Η απαέρωση τον μίγματος γύψου

b) Γέμισμα του μούφλου:

Η διαδικασία είναι εύκολη, προσέχοντας μόνο να μην ρίξουμε το μίγμα απευθείας πάνω στο δέντρο και αποκολληθεί κάποιο τεμάχιο. Έτσι προτιμούμε να το ρίχνουμε πρώτα στον προστατευτικό σταυρό της φλάσκας επιβραδύνοντας τη ροή του και ομαλοποιώντας την πλήρωση. Εξαιτίας του εγκλωβισμού αέρα και σε αυτό το βήμα γίνεται ξανά απαέρωση όλου του μούφλου για 2 min και αφήνεται να στερεοποιηθεί σε δροσερό μέρος. Η πήξη του γύψου γίνεται αρκετά γρήγορα, αλλά απαιτείται περίπου 1 hr για να αποκτήσει ικανοποιητική σκληρότητα. Μετά τη 1 hr απομακρύνουμε τη λαστιχένια βάση και το κολάρο για να τοποθετήσουμε το μούφλο στον αποκερωτή.

Εικόνα 3. 20 Το μούφλο μετά την στερεοποίηση του γύψου και την απομάκρυνση της λαστιχένιας βάσης

VI. Αποκέρωση:

Η διαδικασία της αποκέρωσης πραγματοποιείται σε προθερμασμένο φούρνο, εκτελώντας συγκεκριμένο κύκλο ψησίματος ανάλογα με τις οδηγίες του κατασκευαστή του γύψου και το μέγεθος της φλάσκας, όπως φαίνεται στον πίνακα 3.2.

Πίνακας 3. 2 Οι προτεινόμενοι κύκλοι ψησίματος, ανάλογα με το μέγεθος της φλάσκας

Ο φούρνος που χρησιμοποιήσαμε ήταν ηλεκτρικός με δυνατότητα ελέγχου της θερμοκρασία και του χρόνου, τον οποίο προθερμάναμε στους 150 °C και για διάρκεια 3,5-4 hr. Το τηγμένο κερί απορρέει στη βάση του φούρνου, που είναι κατάλληλα διαμορφωμένος για την περισυλλογή του. Μόλις ολοκληρωθεί η αποκέρωση έχουν δημιουργηθεί τα επιθυμητά αποτυπώματα στο γύψινο καλούπι, το οποίο είναι έτοιμο να ψηθεί σε μεγαλύτερη θερμοκρασία.

VII. Ψήσιμο του γύψινου καλουπιού:

Το ψήσιμο γίνεται σε άλλο ηλεκτρικό φούρνο από αυτόν της αποκέρωσης, με σταδιακή αύξηση της θερμοκρασίας έως τους 350°C για περίπου 2 hr και παραμονή στους 730°C για ακόμα 3-4 hr. Έπειτα ακολουθεί η σταδιακή μείωση της θερμοκρασίας μέχρι τους 550°C για να τοποθετηθεί στη χυτόπρεσα και να ξεκινήσει η χύτευση. Να σημειώσουμε πως η υπερθέρμανση του καλουπιού πάνω από τους 1050°C οδηγεί σε καταστροφή του λόγω ψαθυροποίησής του. Με το ψήσιμο του καλουπιού επιτυγχάνεται επίσης η αντίδραση του αέρα που κυκλοφορεί στο φούρνο με τα υπολείμματα άνθρακα από το κερί, που έχει ως αποτέλεσμα την απομάκρυνσή τους.

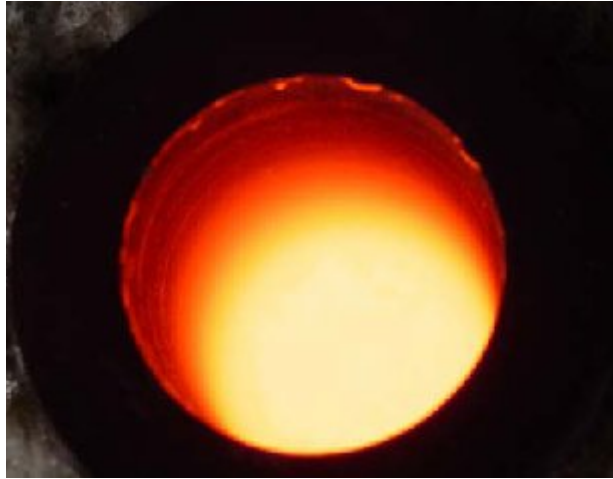
Εικόνα 3. 21 Η ρύθμιση της θερμοκρασίας ψησίματος του καλουπιού.

Εικόνα 3. 22 Το μούφλο στο φούρνο ψησίματος.

VIII. Τήξη μετάλλου:

Το λιώσιμο του μετάλλου είναι καθοριστικής σημασίας παράγοντας για την επιτυχία της χύτευσης. Για να εξασφαλιστεί η επαρκής ροή του στις κοιλότητες του καλουπιού πρέπει να είναι σε θερμοκρασία υψηλότερη της liquidus τόσο ώστε να προλάβει να φτάσει στα πιο απομακρυσμένα σημεία πριν στερεοποιηθεί. Ωστόσο πολύ μεγαλύτερη θερμοκρασία τήξης (υπέρτηξη) οδηγεί σε πληθώρα ελαττωμάτων στα χυτά, όπως πόρους, συρρίκνωση, κακή εμφάνιση κτλ. Η τήξη πραγματοποιείται σε ειδικό θάλαμο της χυτόπρεσας που είναι κατασκευασμένος από γραφίτη και θερμαίνεται με

ηλεκτρικές αντιστάσεις που βρίσκονται περιμετρικά του. Το μέταλλο που προμηθευτήκαμε ήταν σε μορφή λεπτών ελασμάτων και για αυτό ήταν αναγκαία η κοπή τους σε μικρότερα τεμάχια για να χωρέσουν στο χωνί. Η θερμοκρασία τήξης ήταν περίπου 980°C που ρυθμίσαμε από τη μονάδα ελέγχου.



Εικόνα 3. 23 Η τήξη του ορείχαλκου, στο γραφιτένιο χωνί της χυτόπρεσας βαρύτητας.

Να σημειώσουμε πως για την προθέρμανση του χωνιού απαιτούνται περίπου 15 min και για την τήξη του ορείχαλκου 7-8 min. Για να επιτύχουμε όσο το δυνατόν, αναγωγική ατμόσφαιρα προσθέσαμε μικρή ποσότητα βόρακα. Τέλος είναι αναγκαία μερικές φορές η ανάμιξη του τήγματος με κεραμικό αναδευτήρα που να αντέχει σε υψηλές θερμοκρασίες.

IX. Έγχυση του ρευστού μετάλλου στο θερμό καλούπι:

Αφού λιώσουμε το μέταλλο στην επιθυμητή θερμοκρασία, τοποθετούμε τη φλάσκα στην κατάλληλη υποδοχή της χυτόπρεσας. Αρχικά τη βγάζουμε από το φούρνο και πολύ προσεχτικά τη στηρίζουμε στο θάλαμο ανοίγοντας την βάνα του κενού. Στο σημείο αυτό πρέπει να βεβαιωθούμε ότι δημιουργήθηκαν συνθήκες μερικού κενού και το μούφλο παραμένει κατακόρυφο και ακίνητο. Έπειτα «κλείνουμε» τη χυτόπρεσα και την ασφαλίζουμε, για να την αναποδογυρίσουμε 180° , ώστε το χωνί να έρθει ακριβώς πάνω από τη φούσκα του καλουπιού και να μπορεί να ρεύσει το τήγμα υπό την επίδραση της βαρύτητας. Το κενό που έχει δημιουργηθεί στο εσωτερικό του καλουπιού υποβοηθά την πλήρωση, παρέχοντας καλύτερη ροή.

Η απόχυση ολοκληρώνεται σε μερικά δευτερόλεπτα αλλά χρειάζεται να περάσουν μερικά λεπτά για να βεβαιωθούμε ότι το μέταλλο έχει στερεοποιηθεί πλήρως. Τώρα αναποδογυρίζουμε το καλούπι και το σκεύος τήξης στην αρχική τους θέση, απασφαλίζουμε και απομακρύνουμε τη φλάσκα.

Εικόνα 3. 24 Η τοποθέτηση του μούφλου στην πρέσα

Εικόνα 3. 25 Η τελική θέση της

X. Απομάκρυνση του γύψινου καλουπιού:

Για να απομακρύνουμε το γύψο γίνεται η εμβάπτισή του σε νερό, εκμεταλλευόμενοι τη μεγάλη διαφορά θερμοκρασίας. Το καλούπι βρίσκεται περίπου στους 350-400°C με αποτέλεσμα μόλις εισέλθει στο κρύο νερό (20°C) να θρυμματίζεται και να αποκαλύπτει το δέντρο χύτευσης. Για να αποφύγουμε την ψαθυροποίηση των χυτών αποφεύγουμε να εμβαπτίζουμε το καλούπι αμέσως μόλις ολοκληρωθεί η χύτευση, αλλά περιμένουμε 5 min ώσπου να ψυχθεί περισσότερο. Αν όμως κρυώσει παραπάνω από όσο πρέπει τότε η απομάκρυνση του γύψου θα γίνει δύσκολη, αφήνοντας πολλά υπολείμματα πάνω στα αντικείμενα που θα πρέπει να απομακρυνθούν είτε με βούρτσες και χημικό καθαρισμό είτε με αμμοβολή σε μεγαλύτερα χυτά.

Εικόνα 3. 26 Υπολείμματα γύψου πάνω στο χυτό.

XI. Παραλαβή των χυτών:

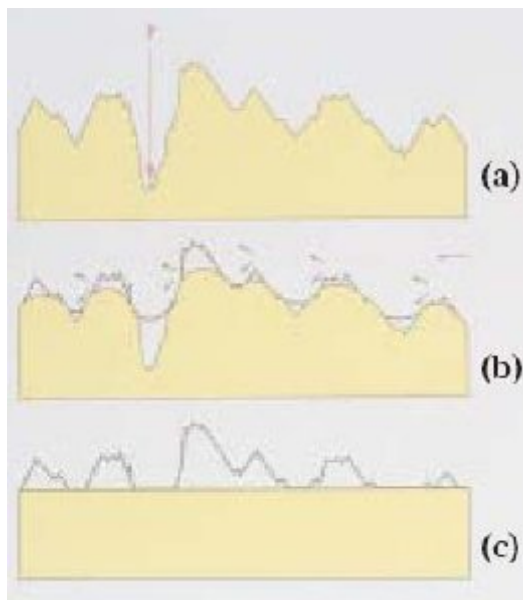
Μετά την απομάκρυνση του γύψινου καλουπιού ακολουθεί η παραλαβή των χυτών που περιλαμβάνει την αποκοπή τους από το δέντρο και την επιφανειακή τους κατεργασία για να αποκτήσουν καλά επιφανειακά χαρακτηριστικά.

Η αποκοπή έγινε με μικρό κόφτη και ήταν ιδιαίτερα απλή εξαιτίας της μικρής σκληρότητας του κράματος που χρησιμοποιήσαμε και της μικρής του διατομής.

Η επιφανειακή επεξεργασία αρχικά περιλαμβάνει το βούρτσισμα των χυτών σε ηλεκτρικό τροχό, με βούρτσες διαφόρων σκληροτήτων. Έτσι απομακρύνονται τα υπολείμματα γύψου και οξειδίων από την επιφάνεια του μετάλλου και μείωση της

τραχύτητάς της. Για την πρόσδοση λάμψης στο χυτό χρησιμοποιήσαμε ειδικό διάλυμα λεύκανσης χυτών που αποτελείται από 100 gr σκόνης βόρακα σε 1 lt νερού.

Να αναφέρουμε πως το βούρτσισμα γίνεται μέχρι ένα οριακό σημείο αφού από κει και πέρα οποιαδήποτε επεξεργασία οδηγεί σε απώλεια υλικού και όχι μείωση της τραχύτητας.



Εικόνα 3. 27 α) η αρχική τραχύτητα της επιφάνειας, β) η μείωση που επιτυγχάνεται με το αρχικό βούρτσισμα και γ) η τελική επιφάνεια.



Εικόνα 3. 28 Μερικά χυτά της χύτευσης με βαρύτητα.

3.2.2 Φυγοκεντρική χυτόπρεσα

3.2.2.1 Χρησιμοποιούμενα μέσα

Στη διαδικασία της φυγοκεντρικής χύτευσης, χρησιμοποιήσαμε τα ίδια μηχανήματα που περιγράφονται και στη μέθοδο βαρύτητας με μόνη διαφορά το διαφορετικό είδος μηχανής χύτευσης, που είναι φυγοκεντρική και φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 3. 29: Η μηχανή φυγοκεντρικής χύτευσης. Διακρίνονται τα εξής

- A: Κύρια μονάδα ελέγχου
- B: Μοχλός ασφάλισης- απασφάλισης φυγοκεντριζόμενου καλουπιού
- C: Διακόπτης ελέγχου ποσοστού ισχύος της αντίστασης του σκεύους τήξης
- D: Ένδειξη ισχύος



Εικόνα 3. 30: Ο θάλαμος της χυτόπρεσσας με την υποδοχή για το καλούπι και τοποθετημένο αντιδιαμετρικά ακριβώς το αντίβαρο

Επίσης εξαιτίας της απουσίας εποπτικού μέσου για τον έλεγχο της θερμοκρασίας του τήγματος στο σκεύος τήξης, χρησιμοποιήσαμε πυρόμετρο.

Εικόνα 3. 31: Το πυρόμετρο

Τα υπόλοιπα εργαλεία παρέμειναν κοινά με τη χύτευση βαρύτητας.

Η μηχανή φυγοκεντρικής χύτευσης:

Το καλούπι στερεώνεται στην ειδική ημικυκλική υποδοχή και μπροστά του υπάρχει το σκεύος τήξης με την οπή για την απόχυση του τήγματος.

Εικόνα 3. 32: Το κεραμικό σκεύος τήξης

Το σκεύος τήξης είναι κατασκευασμένο από κεραμικό υλικό και είναι κατάλληλο για την τήξη πλατίνας αφού η αντοχή του ξεπερνά τους 2000°C.

Η κίνηση της μηχανής οφείλεται στον ηλεκτρικό κινητήρα της SIEMENS τύπου 1LA 7073-4ABB10 με τα εξής χαρακτηριστικά:

Πίνακας 3. 3: Τα χαρακτηριστικά στοιχεία της φυγοκεντρικής χύτευσης

Συχνότητα	50Hz	60Hz
Ισχύς	0,37 kW / 1.05A	0.43 kW/ 1.02A
Σ.Ι	cosφ=0,78 στις 1370 rpm	Cosφ=0.76 @ 1670 rpm
	220-240V/ 380-420 V Δ/Y	440-480V Y
	1,89-1,87/ 1,09-1,08 A	1,08-1,09 A S.F=1.1

Η πρωτεύουσα τροχαλία που βρίσκεται στον άξονα του ηλεκτροκινητήρα, έχει διάμετρο $d=60$ mm και η δευτερεύουσα που βρίσκεται στον κεντρικό άξονα περιστροφής της μηχανής έχει διάμετρο $D=207$ mm. Παράγεται έτσι λόγος μείωσης 1:3.5. που στα 50Hz λειτουργίας αντιστοιχούν σε περίπου 391 rpm του κεντρικού άξονα και στα 60Hz περίπου 477 rpm. Η συχνότητα λειτουργίας του ηλεκτροκινητήρα, η ταχύτητα περιστροφής, η ισχύς του και πλήθος ακόμα στοιχείων εμφανίζονται και ελέγχονται από την μονάδα ελέγχου SIEMENS Sinamics G100CP110AIN. Επίσης η μηχανή διαθέτει ποτενσιόμετρα για τη ρύθμιση της ισχύος της και του χρόνου περιστροφής. Η ψύξη της γίνεται με συνεχή κυκλοφορία νερού, η σωστή λειτουργία του οποίου εμφανίζεται σε αντίστοιχη λυχνία. Η τήξη του μετάλλου πραγματοποιείται με επαγωγικό τρόπο μέσω πηνίου περιμετρικά του σκεύους τήξης. Έτσι δεν είναι δυνατή η έναρξη της τήξης αν δεν υπάρχει μέταλλο που θα λειτουργήσει σαν δευτερεύον πηνίο, μέσα στο σκεύος. Ακόμα η μηχανή διαθέτει τις απαραίτητες διατάξεις ασφάλειας και καπάκι που λειτουργεί με χρονοκαθυστέρηση και δεν ανοίγει αν δεν ακινητοποιηθεί πλήρως το περιστρεφόμενο καλούπι.

Να σημειώσουμε πως αρχικά η χυτόπρεσα δεν ήταν δυνατό να υποδεχθεί θερμοστοιχεία που είναι απαραίτητα για την εκτέλεση των πειραμάτων μας. Έτσι ήταν αναγκαία η τροποποίησή της, που περιλαμβάνει διάνοιξη οπής στον κεντρικό άξονα και τοποθέτηση αναμονής, με καλώδια που περιστρέφονται με κατάλληλο μηχανισμό στη βάση του άξονα.

Τέλος έγινε βαθμονόμηση (καλιμπράρισμα) της πρέσας, τόσο για το χρόνο λειτουργίας της όσο και για την απορροφούμενη ισχύ της, αφού οι ενδείξεις στα ποτενσιόμετρα δεν εμφανίζουν απόλυτα νούμερα αλλά ποσοστά των ονομαστικών μεγεθών.

Έτσι έχουμε:

a) Για το χρόνο λειτουργίας:

Πίνακας 3. 4: Ο χρόνος λειτουργίας της μηχανής ανάλογα με την ένδειξη του ποτενσιόμετρου.

Ένδειξη ποτενσιόμετρου	Χρόνος λειτουργίας (sec)
1	50
2	110
3	160
4	200
5	260

b) Για το ρεύμα λειτουργίας:

Πίνακας 3. 5: Το ρεύμα λειτουργίας της μηχανής ανάλογα με την ένδειξη της οθόνης

Ένδειξη ποτενσιόμετρου	Απορροφούμενη ένταση ρεύματος (A)
500	3,4
600	4,2
700	4,8
900	6,2
1000	9,3

c) Για τις στροφές του ηλεκτροκινητήρα:

Πίνακας 3. 6: Στροφές ηλεκτροκινητήρα

Ένδειξη ποτενσιόμετρου	Συχνότητα λειτουργίας (Hz)	Στροφές (R.P.M)
0	0	0
1	1,00	8
2	10,00	81
3	20,00	152
4	27,00	214
5	35,00	271

6	43,00	340
7	53,00	415
8	60,00	469

3.2.2.2 Πειραματική διαδικασία:

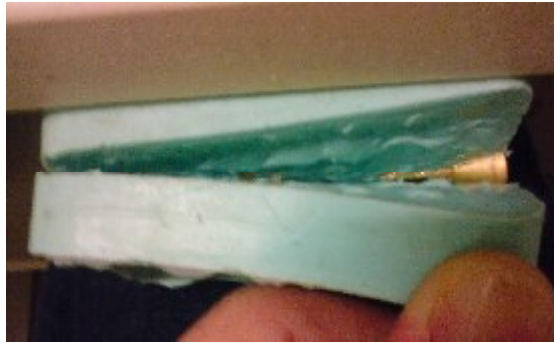
Όπως και στη χύτευση βαρύτητας, έτσι και στη φυγοκεντρική, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του χαμένου κεριού. Οπότε τα βήματα της διαδικασίας παραμένουν κοινά, με ορισμένες αλλαγές που περιγράφονται παρακάτω:

I. Κατασκευή του αρχικού προτύπου:

Χρησιμοποιήθηκε το ίδιο ορειχάλκινο αντικείμενο με τις ίδιες διαστάσεις και ιδιότητες.

II. Κατασκευή λαστιχένιου καλούπι:

Η διαδικασία κατασκευής είναι κοινή, με τη διαφορά χρήσης μπλε λάστιχου της εταιρίας CASTALDO με μικρή διαφορά στη θερμοκρασία τήξης.



Εικόνα 3. 33: Η διαδικασία αφαίρεσης του αρχικού προτύπου από το λαστιχένιο καλούπι

III. Κατασκευή κέρινων ομοιωμάτων:

Το είδος του κεριού, η θερμοκρασία και η πίεση της κεριέρας παρέμειναν οι ίδιες. Ωστόσο κατασκευάστηκε πρότυπο που διέθετε μόνο τις δυο από τρεις διαμέτρους του αρχικού. Η διαμόρφωση έγινε κόβοντας με κοπίδι τη διατομή με διάμετρο 16mm και κολλώντας με κολλητήρι δευτερεύοντα αγωγό τροφοδοσίας στο κέντρο της βάσης του ομοιώματος.

IV. Συναρμολόγηση του δέντρου χύτευσης:

Το δέντρο χύτευσης σε αυτήν την περίπτωση ήταν μικρότερων διαστάσεων για να χωράει στη μικρότερη φλάσκα και είχε τη μορφή που φαίνεται στην εικόνα. Η

συναρμολόγηση έγινε και εδώ με κολλητήρι, προσέχοντας να έχουμε ομαλές ενώσεις των δευτερευόντων αγωγών με τον κεντρικό.



Εικόνα 3. 34: Το δέντρο χύτευσης με τους δυο κλάδους.

V. Πλήρωση του μούφλου με γύψο:

Οι διατιθέμενες φλάσκες για τη φυγοκεντρική χυτόπρεσα, είχαν τις εξής διαστάσεις:

Διάμετρος $d=72\text{ mm}$

Ύψος $H=80\text{ mm}$

οπότε ο όγκος τους είναι $V=325,5\text{ cm}^3$ και σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή του γύψου, χρησιμοποιήσαμε την παρακάτω αναλογία για την παρασκευή του μίγματος:

Μάζα γύψου= 413.65 gr

Όγκος απιονισμένου νερού= 160.15 ml .

Οι διαδικασίες ανάμιξης και απαέρωσης είναι κοινές με τη μέθοδο βαρύτητας.

Εικόνα 3. 35: Η απαέρωση του μούφλου

VI. Αποκέρωση:

Η αποκέρωση πραγματοποιήθηκε στον ίδιο φούρνο ακολουθώντας παρόμοιο κύκλο θέρμανσης

VII. Ψήσιμο καλουπιού:

Και για το ψήσιμο ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία, με μικρότερο κύκλο λόγω μικρότερου μεγέθους της φλάσκας. Η θερμοκρασία του καλουπιού στην αρχή της χύτευσης ήταν περίπου 550°C .

Εικόνα 3. 36: Η στερεοποίηση του γύψου και η απομάκρυνση της λαστιχένιας βάσης.



Εικόνα 3. 37: Το ψήσιμο των μούφλων

VIII. Τήξη του μετάλλου:

Στη φυγοκεντρική χύτευση χρησιμοποιήθηκε το ίδιο κράμα ορείχαλκου Cu70Zn30 που προμηθευτήκαμε σε μορφή μικρών σφαιριδίων. Το μικρό του μέγεθος σε συνδυασμό με τη μικρή ποσότητα που χωράει το σκεύος τήξης και τη μεγάλη ισχύ της μηχανής, οδηγεί σε πολύ γρήγορη τήξη του ορείχαλκου, που ολοκληρώνεται σε περίπου 2-3 min. Για την αποφυγή υπέρτηξης, ελεγχόταν η θερμοκρασία του με πυρόμετρο αλλά και εμπειρικά παρατηρώντας κυανές φλόγες να εμφανίζονται στην επιφάνεια του τήγματος, οι οποίες είναι δυνατόν να ληφθούν σαν ένδειξη της σωστής θερμοκρασίας χύτευσης. Η θερμοκρασία εισαγωγής του τήγματος στο καλούπι ήταν περίπου 930°C. Και εδώ προσθέσαμε μικρή ποσότητα βόρακα για την αποφυγή οξειδωσης.

Εικόνα 3. 38: Το κράμα πριν την τήξη του. Διακρίνεται ο βόρακας (βορικό λέπι) στην επιφάνειά του.

Εικόνα 3. 40: Το σκεύος τήξης με το λιωμένο κράμα, όπως φαίνεται από την ειδική οπή της χυτόπρεσας

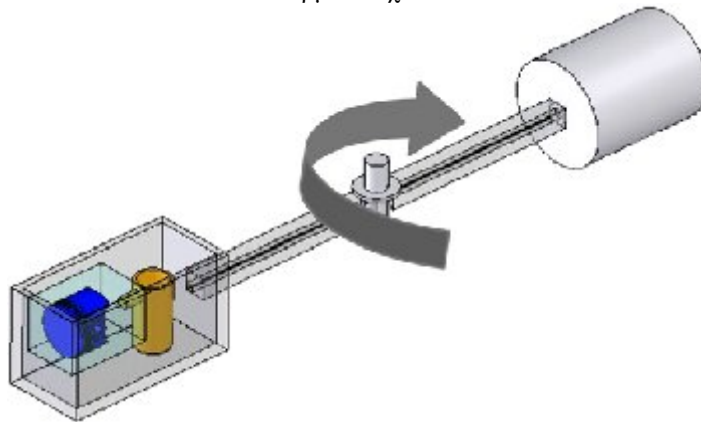
Για να γίνει η έναρξη της τήξης οδηγούμε χειροκίνητα το σκεύος πάνω από το πηνίο και ανασηκώνουμε τον ειδικό μοχλό που το ασφαλίζει σταθερά. Έπειτα κλείνουμε

το συρόμενο καπάκι της μηχανής και από το άνοιγμα που διαθέτει παρατηρούμε την πορεία της τήξης. Μόλις επιτευχθεί η επιθυμητή θερμοκρασία, απασφαλίζουμε το σκεύος τήξης το οποίο πλησιάζει τη φούσκα του καλουπιού μπροστά από τον κεντρικό αγωγό τροφοδοσίας και η διαδικασία της χύτευσης ξεκινά αυτόματα.

IX. Απόχυση ρευστού μετάλλου:

Έχοντας καθορίσει στην αρχή της χύτευσης το χρόνο και την ταχύτητα περιστροφής, ξεκινά η διαδικασία και μέσω των αναπτυσσόμενων φυγόκεντρων δυνάμεων αποχέεται το τήγμα από το σκεύος τήξης στο καλούπι. Αφού ολοκληρωθεί η φυγοκέντριση περιμένουμε μερικά δευτερόλεπτα μέχρι να απασφαλίσει το καπάκι και βγάζουμε τη φλάσκα.. Να σημειώσουμε πως κατά την περιστροφή του καλουπιού προκαλούνται δονήσεις στη μηχανή που πιθανό να επηρεάσουν το αποτέλεσμα και για αυτό απαιτείται το ζύγισμα του περιστρεφόμενου βραχίονα για την εξάλειψή τους. Το ζύγισμα επιτυγχάνεται ξεβιδώνοντας το σημείο στήριξης του βραχίονα του καλουπιού στον κεντρικό άξονα, ώστε να ταλαντεύεται ελεύθερα, και μετατοπίζοντας το περιστρεφόμενο βάρος αντιδιαμετρικά του καλουπιού. Μόλις γίνει η εξισορρόπηση, ασφαλίζουμε πάλι το σημείο στήριξης.

Εικόνα 3. 39: Ο κεντρικός άξονας της μηχανής και ο περιστροφικός μηχανισμός απασφάλισής του. Διακρίνουμε το ρυθμιζόμενο αντίβαρο και την οπή από την οποία περάστηκε η αναμονή για το θερμοστοιχείο.



Εικόνα 3. 40: Σχηματική αναπαράσταση του μηχανισμού περιστροφής της φυγοκεντρικής πρέσας.

X. Απομάκρυνση του γύψινου καλουπιού:

Το σπάσιμο του καλουπιού γίνεται και εδώ με εμβάπτισή του σε κρύο νερό, που οδηγεί σε θρυμματισμό του γύψου.

Εικόνα 3. 41: Η βύθιση του καλουπιού σε κρύο νερό για την απομάκρυνση του γύψου.

XI. Παραλαβή των χυτών:

Η παραλαβή των χυτών γίνεται με τον ίδιο τρόπο, προσέχοντας να μη φθείρουμε την επιφάνεια τους κατά το βούρτσισμα.

Εικόνα 3. 42: Μερικά από τα χυτά που παρασκευάστηκαν με τη φυγοκεντρική πρέσα, μετά το βούρτσισμά τους.

3.3. Εξοπλισμός λήψης μετρήσεων θερμοκρασίας

Η μέτρηση των αναπτυσσόμενων θερμοκρασιών, από τη στιγμή της απόχυσης έως τη στερεοποίηση του λιωμένου μετάλλου, επιτεύχθηκε με τη χρήση θερμοστοιχείων τύπου K, τα οποία τοποθετήσαμε στο εκάστοτε δέντρο χύτευσης. Σε επόμενη παράγραφο παρουσιάζεται ο τρόπος λειτουργίας, οι εφαρμογές τους και τα προβλήματα που προκύπτουν κατά τη χρήση τους.

Λόγω του ότι το σήμα που μεταδίδουν τα θερμοστοιχεία είναι αναλογικό, απαιτείται η χρήση ενός μετατροπέα που παρεμβάλλεται πριν τον ηλεκτρονικό υπολογιστή και το μετατρέπει σε ψηφιακό.



Εικόνα 3. 43: Ο μετατροπέας που χρησιμοποιήσαμε

Για μεγαλύτερη ευκολία χρησιμοποιήσαμε φορητό ηλεκτρονικό υπολογιστή (laptop), που διαθέτε το πρόγραμμα PDAQ VIEW, ώστε να είναι εφικτή η επισκόπηση των μετρήσεων από τα θερμοστοιχεία, τις οποίες επεξεργαστήκαμε στο πρόγραμμα EXCEL.

Εικόνα 3. 44: Η απευθείας απεικόνιση των μετρήσεων σε laptop.

3.3.1 Θερμοστοιχεία

Ορισμός:

Τα θερμοστοιχεία είναι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της θερμοκρασίας. Αποτελούνται από δυο ηλεκτρόδια διαφορετικού μετάλλου που είναι ενωμένα μεταξύ τους σχηματίζοντας ένα κοινό άκρο. Η λειτουργία τους βασίζεται στο φαινόμενο του Seebeck κατά το οποίο όταν δυο ανόμοια μέταλλα έρθουν σε επαφή μεταξύ τους δημιουργείται διαφορά δυναμικού η οποία μεταβάλλεται με τη θερμοκρασιακή διαφορά. Πρέπει να τονιστεί ότι τα θερμοστοιχεία δε μετράνε απόλυτη θερμοκρασία αλλά θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα σε δυο σημεία. Έτσι θεωρούμε γνωστή τη θερμοκρασία του ενός άκρου (του ψυχρού) και το άλλο το τοποθετούμε στη περιοχή που επιθυμούμε να κάνουμε τη μέτρηση. Η διαφορά δυναμικού που αναπτύσσεται είναι δυνατό να μετατραπεί σε θερμοκρασιακές μονάδες με δυο τρόπους

A) Πίνακες αντιστοιχίας διαφοράς δυναμικού-θερμοκρασίας

B) Πολυωνυμική παρεμβολή

Σύνδεση:

Τα θερμοστοιχεία τοποθετούνται στο μετρητικό όργανο στο ένα άκρο τους και το άλλο στην περιοχή που μετράμε. Συνήθως χρησιμοποιούνται και ηλεκτρόδια προέκτασής τους τα οποία πρέπει να είναι από το ίδιο υλικό, με την κατάλληλη μόνωση ώστε να επιτύχουμε ικανοποιητικά αποτελέσματα.. Σε αντίθετη περίπτωση χρησιμοποιούμε καλώδια προέκτασης από ανόμοιο υλικό τα οποία είναι φθηνότερα αλλά λιγότερο αποτελεσματικά.

Μετατροπή:

Η σχέση που συνδέει τη διαφορά δυναμικού με τη θερμοκρασία είναι μη γραμμική και μπορεί να προσεγγιστεί με πολυωνυμικούς συντελεστές της ακόλουθης μορφής:

$$T = \sum_{n=0}^N a_n \cdot v^n \quad (3.1)$$

Τύποι θερμοστοιχείων:

Ανάλογα με το εύρος της θερμοκρασιακής διαφοράς και την ακρίβεια που επιθυμούμε μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε διάφορους τύπους θερμοστοιχείων. Στην περίπτωση μας θα εξετάσουμε τον «τύπο K» ωστόσο υπάρχουν και άλλοι τύποι όπως οι E, J, N, B, R, S, T, C και M.

Τύπος K: Είναι από τους πιο συνηθισμένους τύπους θερμοστοιχείων. Τα ηλεκτρόδια αποτελούνται από χρώμιο, νικέλιο και αλουμίνιο. Είναι σχετικά φθηνά και διατίθενται σε ποικιλία ενώσεων των άκρων. Μπορούν να μετρήσουν θερμοκρασίες από -200 ως 1250 βαθμούς Κελσίου. Έχουν όμως ένα βασικό μειονέκτημα που είναι η μαγνητικότητα του νικελίου που επηρεάζει την ακρίβεια της μέτρησης κοντά στη θερμοκρασία Curie του νικελίου (345 Κελσίου). Η ευαισθησία αυτού του τύπου θερμοστοιχείων είναι περίπου 41 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$.



Εικόνα 3. 45: Το σκαρίφημα ενός θερμοστοιχείου τύπου K.

Παρακάτω φαίνεται ένας πίνακας με τις ιδιότητες των διαφόρων τύπων θερμοστοιχείων:

Πίνακας 3. 7 Οι ιδιότητες των θερμοστοιχείων τύπου K

--	--	--	--	--	--	--	--

--	--	--	--	--	--	--	--

Εφαρμογές:

Τα θερμοστοιχεία χρησιμοποιούνται συνηθέστερα σε εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών $<1800^{\circ}\text{C}$ και σπανιότερα σε ψυχρότερα θερμοκρασιακά περιβάλλοντα $<100^{\circ}\text{C}$. Έτσι η χρήση τους συναντάται κυρίως σε :

A) Μεταλλοβιομηχανίες: χρησιμοποιούνται για την επίβλεψη των θερμοκρασιών κατά την παρασκευή των μετάλλων μέσα σε φούρνους ή υψικαμίνους ώστε να είναι δυνατή, μέσω της ανάλυσης των καμπυλών απόψυξης, ο προσδιορισμός της σύστασης σε άνθρακα.

B) Συσκευές Πυρασφάλειας: χρησιμοποιούνται συνήθως σε περίπτωση βλάβης του βασικού συστήματος πυρασφάλειας (εκτοξευτές νερού, αφρού) ελέγχοντας κάποια βαλβίδα παροχής καυσίμου ή εύφλεκτου αερίου, ανάλογα με τη θερμοκρασία, αποτρέποντας έτσι επέκταση της φωτιάς,

Τέλος, έχουν εφαρμογή σε περιπτώσεις μέτρησης της έντασης «τυχαίας» ακτινοβολίας που είναι ορατή μόνο με υπέρυθρο φως, καθώς επίσης και για τη δημιουργία ηλεκτρισμού σε θερμοηλεκτρικές γεννήτριες ραδιοϊσότοπων.

Προβλήματα κατά τη χρήση των θερμοστοιχείων:

- Στη σύνδεση τους: Για παράδειγμα σε περιπτώσεις προέκτασής τους είναι σημαντικό να χρησιμοποιούνται όμοια ηλεκτρόδια, να ελέγχεται η πολικότητά τους και να μην έρχονται σε επαφή εκτός του κοινού άκρου τους,
- Κύρια αντίσταση: Για τη μείωση της θερμοκρασιακής διαστρέβλωσης και για βελτίωση του χρόνου αντίδρασης, τα θερμοστοιχεία κατασκευάζονται από λεπτό

σύρμα, γεγονός που αυξάνει την αντίσταση τους. Επίσης, τα καθιστά πιο ευαίσθητα σε θορύβους προκαλώντας σφάλματα.

- ο Απορρύθμιση: Σε περιπτώσεις τροποποίησης του μήκους ή της μόνωσης των θερμοστοιχείων, είναι πιθανή, σε υψηλές θερμοκρασίες, η διάχυση ατμοσφαιρικών στοιχείων στο μέταλλό τους. Το ίδιο συμβαίνει και όταν η μόνωση δεν είναι κατάλληλη για μια συγκεκριμένη εφαρμογή και διαχέονται ακαθαρσίες και χημικές ουσίες που αλλοιώνουν τη μέτρηση.

- ο Θόρυβος: Εξαιτίας της μικρής ισχύος του παραγόμενου σήματος από τα θερμοστοιχεία, είναι εύκολη η είσοδος θορύβου από κοντινές συσκευές ή μηχανήματα. Για να αποφύγουμε αυτό το φαινόμενο περιστρέφουμε το ένα σύρμα γύρω από το άλλο ώστε να αναγνωρίζουν και τα δυο το ίδιο ποσοστό θορύβου και να είναι ευκολότερη η απόρριψή του από το μετρητικό όργανο.

Ακόμα, σφάλματα προκύπτουν λόγω της θέρμανσης της ίδιας της μάζας των θερμοστοιχείων αλλά και λόγω τυχαίων αυξήσεων του δυναμικού που «βλέπει» το μετρητικό όργανο και οφείλονται σε επαγωγικά ρεύματα ή σε γειωμένες ενώσεις.

3.3.2 Λήψη μετρήσεων Θερμοκρασίας

Τα θερμοστοιχεία, σε όλη τη διάρκεια της χύτευσης, ήταν συνδεδεμένα με ένα φορητό ηλεκτρονικό υπολογιστή μέσω ενός αναλογικό-ψηφιακού μετατροπέα. Ο αναλογικός-ψηφιακός μετατροπέας χρησιμοποιείται για τη μετατροπή των αναλογικών σημάτων που παρέχουν οι μεταλλάκτες θερμοκρασίας σε ψηφιακές πληροφορίες, καθώς και για την εν συνεχεία μετάδοσή τους προς τον Η/Υ. Ο αναλογικός-ψηφιακός μετατροπέας που χρησιμοποιήθηκε, περιείχε έναν πολυπλέκτη ο οποίος δεχόταν τα αναλογικά σήματα από τα θερμοστοιχεία, ψηφιοποιώντας τα εισερχόμενα δεδομένα. Η λήψη των δεδομένων, πραγματοποιήθηκε μέσω του προγράμματος pdaq view. Στη συνέχεια, οι μετρήσεις αποθηκεύτηκαν σε αρχεία Excel.

3.4. Εξοπλισμός Μελέτης Μικροδομής

Η διαδικασία της μεταλλουργικής εξέτασης πραγματοποιείται για τη μελέτη της μικροδομής σε διάφορα σημεία του χυτού. Η προετοιμασία και τα βήματα που ακολουθήθηκαν, περιγράφονται παρακάτω:

1. Αρχικά καθαρίζουμε την επιφάνεια του σχηματισμένου πλινθώματος ώστε να απομακρυνθούν τα υπολείμματα γύψου από το καλούπι.
2. Στη συνέχεια αποκόπτουμε το δοκίμιο από το δέντρο χύτευσης ώστε να γίνει ο τεμαχισμός του με τη βοήθεια κοπτικού τροχού.

Εικόνα 3. 46: Το χυτό τεμαχισμένο σε τρία τμήματα, πριν τον εγκιβωτισμό τους.

3. Τα τμήματα που προέκυψαν από την κοπή πρέπει να διαθέτουν διαστάσεις τέτοιες ώστε αφενός να εξυπηρετούνται οι απαιτήσεις της μελέτης, αφετέρου να μπορούν να εγκιβωτιστούν σε ρητίνη. Ο εγκιβωτισμός γίνεται με τέτοιο τρόπο που να επιτρέπει στην προς εξέταση επιφάνεια να μένει εκτεθειμένη για την επεξεργασία της και την εκτέλεση μετρήσεων. Με γνώμονα τα παραπάνω, τα δείγματα που πήραμε για το δοκίμιο της χύτευσης βαρύτητας είναι αυτά που φαίνονται στο σχήμα 3.49.



Εικόνα 3. 47: Τα τμήματα του χυτού εγκιβωτισμένα, πριν τη λείανσή τους

4. Αφού αφήσουμε τη ρητίνη να στερεοποιηθεί, το δείγμα είναι έτοιμο για τη διαδικασία της λείανσης. Η λείανση πραγματοποιήθηκε σε μηχανήμα τύπου “Struers Labopol-5 Laboteforce” και έχει στόχο να παραχθεί μια όσο το δυνατόν πιο λεία και ομαλή επιφάνεια, χωρίς ίχνη από εκδορές και ανομοιομορφίες που παράγει η διαδικασία

της κοπή. Η ταχύτητα του μηχανήματος είναι 3000 rpm και η λείανση εκτελέστηκε σταδιακά κάνοντας χρήση διαφόρων βαθμών τραχύτητας λειαντικών δίσκων. Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνονται τα στάδια που ακολουθήσαμε.

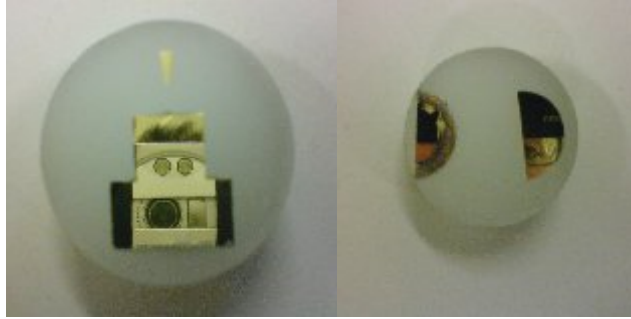
Πίνακας 3. 8 Η διαδικασία λείανσης των δοκιμίων

Τραχύτητα λειαντικού χαρτιού	Λειπαντικό	Χρόνος
200	Νερό	1 min
500	Νερό	1 min
800	Νερό	1 min
1200	Νερό	2 min
2400	Νερό	2 min



Εικόνα 3. 48: Η μηχανή λείανσης και οι δίσκοι που χρησιμοποιήθηκαν

5. Επόμενο βήμα είναι η στίλβωση, που γίνεται για να αφαιρεθούν τα σημάδια και οι χαραγές της λείανσης. Η διαδικασία της στίλβωσης πραγματοποιήθηκε στο ίδιο μηχανήμα αλλά με αντί για λειαντικά χαρτιά χρησιμοποιήσαμε φύλλα από βελούδο σε συνδυασμό με πάστα αλούμινας. Η πάστα ήταν δυο ειδών, με διάμετρο κόκκων 1 μm και 0,1 μm , αντίστοιχα. Και εδώ απαιτούνταν μικρή παροχή νερού για τη διάλυση της πάστας και η διαδικασία διήρκεσε περίπου 2 min κάθε φορά. Μετά το πέρας της διαδικασίας, η επιφάνεια του δοκιμίου έγινε στιλπνή και λεία, όπως διακρίνεται και στις εικόνες.

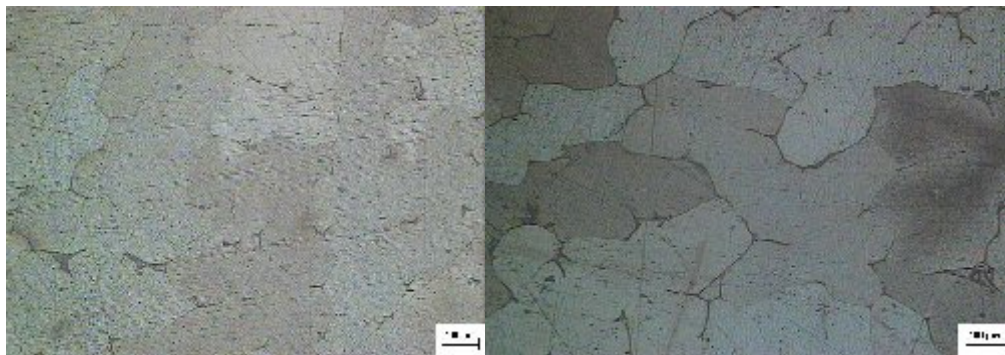


Εικόνα 3. 49: Τα δοκίμια μετά τη λείανση και τη στίλβωσή τους

6. Το τελευταίο στάδιο πριν τη διεξαγωγή μεταλλογραφικής εξέτασης είναι η χημική προσβολή της επιφάνειας του δοκιμίου, ώστε να είναι δυνατή η εμφάνιση της μικροδομής στο μικροσκόπιο. Επιπλέον, με τη χημική προσβολή επιτυγχάνεται και η αφαίρεση του λεπτού «φίλμ» ακαθαρσιών, που προκαλεί η στίλβωση.

Στην περίπτωση μας το αντιδραστήριο που χρησιμοποιήσαμε είναι το διάλυμα “11” του πίνακα 3.9.

Πρέπει να είμαστε προσεκτικοί με το χρόνο που θα διαρκέσει η χημική προσβολή, αφού είναι πιθανό αν ξεπεραστεί κάποιο χρονικό όριο να καταστραφεί η επιφάνεια και να απαιτείται εκ νέου λείανση και στίλβωση. Το αντιδραστήριο που χρησιμοποιήσαμε αφέθηκε να δράσει για περίπου 40 sec, χρόνος ικανός για φανούν τα όρια των κόκκων και η μικροδομή, όπως φαίνεται στις εικόνες:



Εικόνα 3.50: Στις φωτογραφίες αυτές από το οπτικό μικροσκόπιο φαίνονται οι κόκκοι του υλικού που αποτελούνται από ακραίο στερεό διάλυμα α φάσης..

Πίνακας 3. 9: Αντιδραστήρια για χημική προσβολή ορείχαλκου

10.	FeCl ₃ , g	HCl, mL	H ₂ O, mL	Immersion or swabbing; etch lightly or by successive light etches to required results	Coppers, brasses, bronzes, aluminum bronze; darkens β phase in brass; gives contrast following dichromate and other etches
	5	50	100		
	20	5	100 ^{(c)(d)}		
	25	25	100		
	1	20	100		
	8	25	100		
	5	10	100 ^{(e)(d)}		
11.	5 g FeCl ₃ , 100 mL ethanol, 5–30 mL HCl			Immersion or swabbing for 1 s to several minutes	Coppers and copper alloys; darkens β phase in α-β brasses and aluminum brass
12.	HNO ₃ (various concentrations)			Immersion or swabbing; 0.15–0.3% AgNO ₃ added to 1:1 solution gives a brilliant, deep etch	Coppers and copper alloys

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

3.5. Χύτευση Βαρύτητας

- 3.5.1. Εκτέλεση Πειραμάτων Χύτευσης Βαρύτητας
- 3.5.2. Περιγραφή του τρόπου προσομοίωσης της χύτευσης βαρύτητας (παράμετροι τρεξίματος, οριακές συνθήκες).
- 3.5.3. Εύρεση του Συντελεστή Μετάδοσης Θερμότητας.
- 3.5.4. Περιγραφή Inverse Modeling
- 3.5.5. Μελέτη επίδρασης παραμέτρων Χύτευσης Βαρύτητας στην ποιότητα του χυτού, για Direct Modeling

3.6. Φυγοκεντρική Χύτευση

- 3.6.1. Εκτέλεση Πειραμάτων Φυγοκεντρικής Χύτευσης
- 3.6.2. Περιγραφή του τρόπου προσομοίωσης της φυγοκεντρικής χύτευσης
- 3.6.3. Εύρεση του Συντελεστή Μετάδοσης Θερμότητας
- 3.6.4. Μελέτη επίδρασης παραμέτρων Φυγοκεντρικής Χύτευσης στην ποιότητα του χυτού, για Direct Modeling

3.7. Σύγκριση αποτελεσμάτων Χύτευσης βαρύτητας και Φυγοκεντρικής.

- 3.7.1. Για τη Χύτευση Βαρύτητας
- 3.7.2. Για τη Φυγοκεντρική Χύτευση

4.4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

5.

5.1. 4.1 Χύτευση Βαρύτητας

5.1.1. 4.1.1 Εκτέλεση πειραμάτων χύτευσης βαρύτητας

Κατά την εκτέλεση πειραμάτων με τη μηχανή βαρύτητας, δεν έχουμε τη δυνατότητα ελέγχου πολλών παραμέτρων, παρά μόνο της θερμοκρασίας εισαγωγής του τήγματος στον τύπο, η οποία ρυθμίζεται, με σχετικά μικρή απόκλιση, από την ειδική μονάδα της πρέσας, καθώς επίσης και της θερμοκρασίας καλουπιού, η οποία ρυθμίζεται με βάση τη θερμοκρασία του φούρνου.

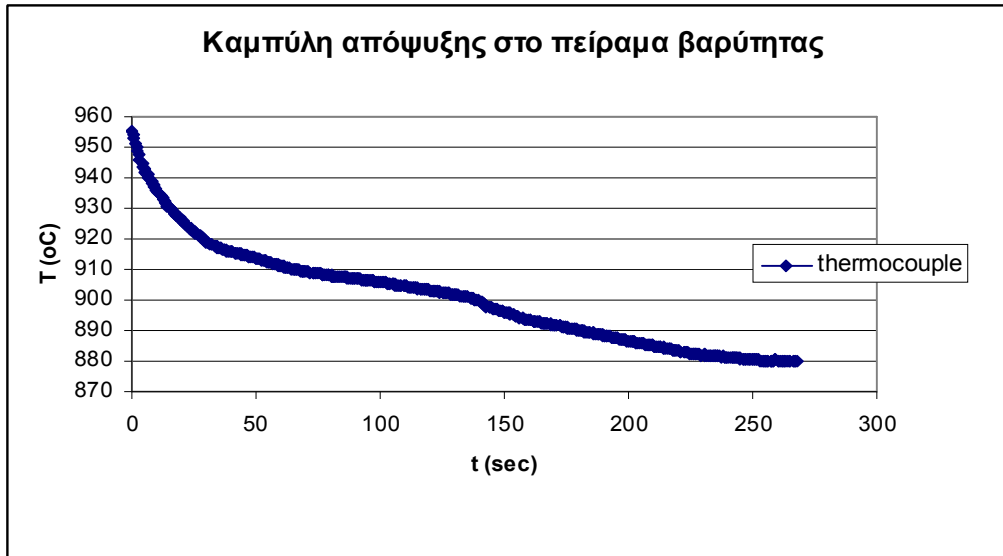
Έτσι λοιπόν μετά την εκτέλεση πολλών πειραμάτων εξοικείωσης με τη διαδικασία και την κατασκευή προτύπων, πραγματοποιήθηκε το πείραμα από το οποίο μετρήσαμε την απόψυξη του τήγματος συναρτήσει του χρόνου. Το θερμοστοιχείο τοποθετήθηκε στη μεγάλη διάμετρο του χυτού, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4. 1.



Εικόνα 4. 1 Το σημείο μέτρησης της θερμοκρασίας στη χύτευση βαρύτητας

Η επιθυμητή θερμοκρασία εισαγωγής του τήγματος στον τύπο πρέπει να είναι τέτοια ώστε να εξασφαλιστεί η πλήρωση του πριν την έναρξη της στερεοποίησης του κράματος, για την αποφυγή δημιουργίας κενών. Ωστόσο δεν πρέπει να είναι αρκετά υψηλή γιατί έτσι η επιφανειακή ποιότητα του χυτού δε θα είναι ικανοποιητική. Από την εκτέλεση διαφόρων πειραμάτων με διαφορετικές αρχικές θερμοκρασίες τήγματος, παρατηρήθηκε

ότι εκείνη που ικανοποιούσε τους παραπάνω περιορισμούς ήταν μεταξύ της περιοχής 950°C-960 °C. Έτσι, η καμπύλη απόψυξης που προέκυψε για αρχική θερμοκρασία τήγματος στην περιοχή αυτή και για το συγκεκριμένο σημείο του χυτού, ήταν η εξής:

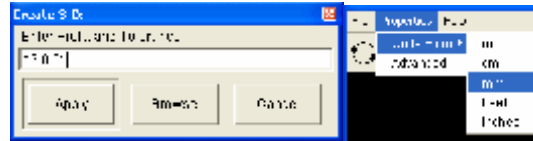


Διάγραμμα 4. 1 Η πειραματική καμπύλη απόψυξης

5.1.2. 4.1.2 Περιγραφή του τρόπου προσομοίωσης της χύτευσης βαρύτητας

Η προσομοίωση της χύτευσης βαρύτητας έγινε ακολουθώντας τα βήματα του προγράμματος PROCAST όπως αναφέρθηκαν στο 2^ο κεφάλαιο της εργασίας. Αρχικά πραγματοποιήθηκε η σχεδίαση του μοντέλου με συγκεκριμένες διαστάσεις στο module PreCast:

Ο σχεδιασμός έγινε με τα εργαλεία του MeshCast, παρόλο που θα μπορούσαμε να το εισάγουμε από κάποιο άλλο σχεδιαστικό πρόγραμμα όπως π.χ το AutoCAD. Για να γίνει αυτό ξεκινάμε δημιουργώντας ένα αρχείο όπου ορίζουμε prefix, ανοχή (ακρίβεια) και μονάδες εισαγωγής των δεδομένων. Έτσι θέσαμε prefix «o3», ακρίβεια 0,01 και μονάδες εισαγωγής σε mm. αφού εμφανίστηκε το σχετικό παράθυρο επιβεβαίωσης των παραπάνω, ξεκινάμε τη δημιουργία του μοντέλου, η οποία έγινε τμηματικά.

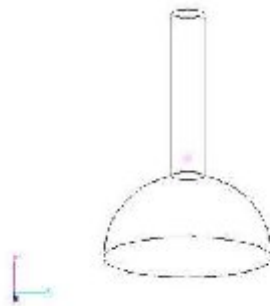


Εικόνα 4. 2 Ο ορισμός της ακρίβειας και των μονάδων εισαγωγής των δεδομένων, στο MeshCast.

Αρχικά σχεδιάστηκε ο κεντρικός αγωγός τροφοδοσίας με τις εξής διαστάσεις:

- Ακτίνα $r = 5\text{mm}$
- Ύψος $H=50\text{mm}$

Έπειτα σχεδιάστηκε η φούσκα της βάσης με ακτίνα $r = 25\text{mm}$ και στη συνέχεια ο δευτερεύων αγωγός τροφοδοσίας, υπό γωνία 45° ως προς τον κεντρικό σε απόσταση 60mm από τη βάση.



Εικόνα 4. 3 Ο σχεδιασμός του κεντρικού αγωγού τροφοδοσίας και της φούσκας.

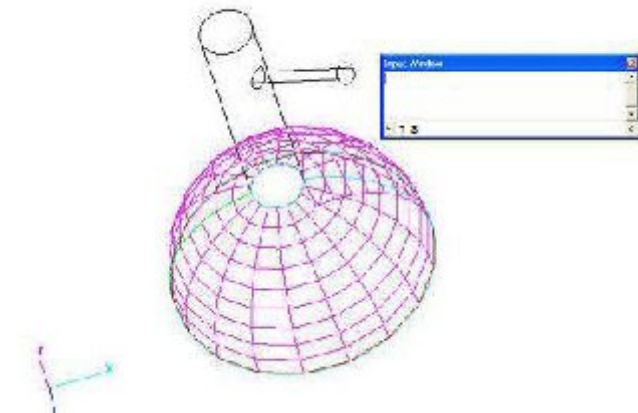
Οι διαστάσεις του δευτερεύοντος αγωγού ήταν:

- Ακτίνα $r = 2\text{mm}$
- Ύψος $H=35\text{mm}$

Στο σημείο αυτό έγινε έλεγχος των επιφανειών που αποτελούν το μοντέλο μέχρι στιγμής και των ακμών που τις απαρτίζουν. Να σημειώσουμε ότι το PROCAST λειτουργεί με τη λογική πως μια ακμή πρέπει να ανήκει σε μια επιφάνεια για να μπορέσει να την αναγνωρίσει και να εμφανίσει τις ιδιότητές της. Η αναγνώριση των επιφανειών επιτυγχάνεται με δυο τρόπους:

Α. Πατάμε το πλήκτρο DISPLAY και στο Message Window εμφανίζεται ο αριθμός των επιφανειών του σχήματος που έχουμε δημιουργήσει. Ορίζοντας τώρα στο input Window νούμερα επιφανειών (π.χ επιφάνεια #2) και πατώντας DISPLAY εμφανίζεται η συγκεκριμένη επιφάνεια με το πλέγμα της και τις ακμές που την αποτελούν. Να σημειώσουμε ότι η αρίθμηση ξεκινάει από το 0.

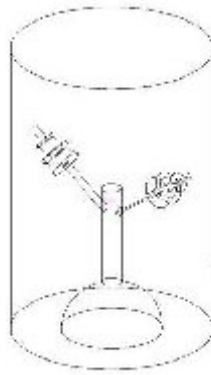
Β. Επιλέγοντας τις ακμές που πιστεύουμε ότι ανήκουν στην ίδια επιφάνεια και πατώντας το πλήκτρο IDENTIFY εμφανίζεται στο message Window ένα μήνυμα της ακόλουθης μορφής: “ Fx * Fy”, με το x να αναπαριστά την επιφάνεια και το y τον αριθμό των ακμών της. Προσοχή χρειάζεται να δώσουμε στο ότι το PROCAST αλλάζει την αρίθμηση ανάλογα με την προσθαφαίρεση των ακμών που κάνουμε κατά την εξέλιξη της σχεδίασης.



Εικόνα 4. 4 Η φούσκα του μούφλου και το πλέγμα από το οποίο αποτελείται.

Αφού σχεδιάσαμε και τον δευτερεύοντα αγωγό συνεχίσαμε με το τεμάχιο χύτευσης, το οποίο αποτελούνταν από 3 ομόκεντρους κυλίνδρους, με διαστάσεις που φαίνονται παρακάτω:

Στο σημείο αυτό με σχηματισμένο το ένα μόνο τεμάχιο επιλέγουμε όλες τις ακμές του πρώτου κλάδου που έχουμε κατασκευάσει και πατάμε το πλήκτρο Rotational Symmetry κάνοντας περιστροφή γύρω από τον κατακόρυφο άξονα κατά 180° . έτσι ολοκληρώνεται το δέντρο χύτευσης. Τέλος πρέπει να πραγματοποιηθεί και ο σχεδιασμός του καλουπιού με διαστάσεις διαμέτρου $d= 100\text{mm}$ και ύψος $h=150\text{mm}$.



Εικόνα 4. 5 Η ολοκληρωμένη σχεδίαση του μοντέλου, με τα τεμάχια χύτευσης και το καλούπι.

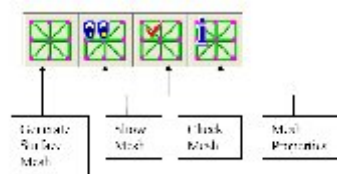
Αφού ολοκληρωθεί η σχεδίαση όλων των τμημάτων, πρέπει να δημιουργηθεί το επιφανειακό πλέγμα, ορίζοντας το μέγεθος των στοιχείων που το αποτελούν, ανάλογα με το πόσο πυκνό ή αραιό επιθυμούμε να φαίνεται κάθε κομμάτι του μοντέλου. Αυτό επιτυγχάνεται επιλέγοντας τις ακμές που αποτελούν μια κλειστή γραμμή, πατώντας το πλήκτρο STORE και ορίζοντας την επιθυμητή τιμή. Στο μοντέλο μας εισάγαμε τα ακόλουθα:

Add:	store	Delete
Groups	#10:	Le=qt"
[-] k_ala_pi	8	17.00"
[-] k_ironi	10	8.00"
[-] temasio	40	1.00"

Εικόνα 4. 6 Ο ορισμός της πυκνότητας του επιφανειακού πλέγματος, για κάθε τμήμα ξεχωριστά.

Εικόνα 4. 7 Το τελικό επιφανειακό πλέγμα.

Στο σημείο αυτό ξαναγίνεται έλεγχος, για τυχόν σφάλματα του πλέγματος πατώντας διαδοχικά τα εξής πλήκτρα: “Generate surface Mesh”, “Show Mesh” και “Check Mesh”.



Εικόνα 4. 8

Μετά τη δημιουργία επιφανειακού πλέγματος, δημιουργούμε και ογκικό πλέγμα πατώντας το πλήκτρο “go volume meshing”. Στο παράθυρο που ανοίγεται επιλέγουμε

την καρτέλα “Tet mesh” και πατάμε “Generate tet meshing”. Εν τέλει έχουμε το παρακάτω μοντέλο, το οποίο αποτελείται από δυο υλικά - το χυτό και το καλούπι. Επίσης στο στάδιο αυτό μπορούμε να κάνουμε βελτιστοποίηση του πλέγματος και στη συνέχεια να προχωρήσουμε στο module PreCast.

Το PreCast είναι το module στο οποίο ορίζουμε τις παραμέτρους της χύτευσης. Το πρώτο βήμα αφορά την επιλογή υλικών τόσο για το καλούπι, όσο και για το χυτό. Από τη λίστα των έτοιμων στοιχείων του προγράμματος, επιλέγουμε ως υλικό καλουπιού, τον γύψο “Plaster” και για το χυτό ορίζουμε το κράμα Cu667Zn333, το οποίο δεν υπάρχει στη λίστα των υλικών και για αυτό χρειάζεται να το προσθέσουμε εμείς. Να σημειώσουμε ότι επιλύουμε ροϊκό και θερμικό πρόβλημα, για αυτό θέσαμε το τμήμα του χυτού να είναι κενό κατά την έναρξη της προσομοίωσης. Η δημιουργία του κράματος ξεκινά από την καρτέλα “Materials” πατώντας το πλήκτρο ADD και ορίζοντας τις επιθυμητές ιδιότητες. Για το κράμα που χρησιμοποιήσαμε ορίσαμε τις ακόλουθες ιδιότητες:

- Σύσταση: 66,7% Χαλκός(Cu) και 33,3 % Ψευδάργυρος (Zn)
- Θερμική αγωγιμότητα (Conductivity): συναρτήσει της θερμοκρασίας, όμοια με αυτή του καθαρού χαλκού, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4. 9.

Εικόνα 4. 9 Η θερμική αγωγιμότητα του ορείχαλκου που επιλέξαμε, συναρτήσει της θερμοκρασίας.

- Πυκνότητα (density): ορίστηκε συναρτήσει της θερμοκρασίας συνδυάζοντας την πυκνότητα του καθαρού χαλκού και του καθαρού ψευδαργύρου, με τις ακόλουθες τιμές (Εικόνα 4. 10):

Εικόνα 4. 10 Η πυκνότητα του κράματος συναρτήσει της θερμοκρασίας.

- Ειδική θερμότητα (Specific Heat): ορίστηκε ίδια με του κράματος Cu70Zn30 (που υπάρχει στη βάση του ProCAST), όπως φαίνεται στην Εικόνα 4. 11:

Εικόνα 4. 11 Η ειδική θερμότητα του ορείχαλκου.

- Θερμοκρασίες τήξης και στερεοποίησης:

Εικόνα 4. 12 Οι θερμοκρασίες liquidus και solidus

Διεπιφάνεια- ορισμός HTC:

Αφού ολοκληρωθεί η καταχώρηση του νέου υλικού, πρέπει να ορίσουμε τη διεπιφάνεια καλουπιού-χυτού και το συντελεστή μετάδοσης θερμότητας σε αυτή. Από την καρτέλα “Interface” ορίζουμε η διεπιφάνεια να είναι τύπου “COINC” ώστε οι κόμβοι μεταξύ καλουπιού και χυτού να ταυτίζονται. Εναλλακτικά υπάρχουν και οι επιλογές “EQUIV” και “NCOINC”. Επίσης θέτουμε και συγκεκριμένο συντελεστή μεταφοράς θερμότητας, ο οποίος στην περίπτωση μας είχε πολλές διαφορετικές τιμές ώστε να προσεγγιστούν καλύτερα τα πειραματικά αποτελέσματα.

Ορισμός συνοριακών συνθηκών:

Σειρά έχουν οι συνοριακές συνθήκες, οι οποίες προσδιορίζονται από την καρτέλα “Boundary Conditions” και περιλαμβάνουν τα ακόλουθα:

- Θερμοκρασία καλουπιού πριν την εισαγωγή του τήγματος: 660°C , την οποία αντιστοιχίσαμε στους κατάλληλους κόμβους, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4. 13:

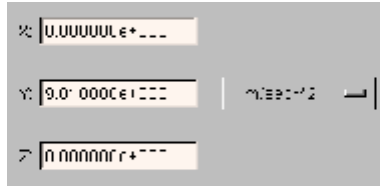
Εικόνα 4. 13 Η απόδοση της αρχικής θερμοκρασίας καλουπιού, στου ανάλογους κόμβους.

- Αρχική θερμοκρασία ρευστού μετάλλου: 955°C , η οποία είναι η θερμοκρασία εισαγωγής του τηγμένου κράματος στο καλούπι.
- Παροχή μάζας τήγματος: $0,564\text{ kg/sec}$. Η παροχή του μετάλλου υπολογίστηκε προσεγγιστικά από το χρόνο που απαιτείται για την πλήρωση του καλουπιού και τη μάζα των χυτών. Τα δυο παραπάνω μεγέθη αντιστοιχούν στους κόμβους της βάσης της φούσκας όπως διακρίνεται παρακάτω:

Εικόνα 4. 14 Η αρχική θερμοκρασία τήγματος στους κόμβους που αντιστοιχεί.

Πλέον είμαστε έτοιμοι να καθορίσουμε τη διαδικασία χύτευσης και το διάνυσμα της βαρύτητας από την καρτέλα “Process”, το οποίο είναι απαραίτητο για τη ροή του τήγματος στο καλούπι και για την επίλυση του θερμικού και ροϊκού προβλήματος.

Έτσι ορίστηκε 9.81m/sec^2 με κατεύθυνση τα θετικά του άξονα Υ:



Εικόνα 4. 15 Ο καθορισμός του διανύσματος βαρύτητας.

Ορισμός Αρχικών Συνθηκών:

Επειδή επιλύουμε χρονικά μεταβαλλόμενο πρόβλημα, είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός των αρχικών συνθηκών (Initial conditions), για τις οποίες έχουμε τα ακόλουθα:

- Θερμοκρασία καλουπιού κατά την είσοδο του ρευστού μετάλλου: 660°C
- Θερμοκρασία τήγματος: 955°C

Τα παραπάνω μεγέθη παρόλο που τα ορίσαμε και στις οριακές συνθήκες, τα θεωρούμε και αρχικές συνθήκες ώστε το πρόγραμμα να τις «αντιληφθεί» σαν θερμοκρασίες σε όλο το καλούπι και όχι μόνο στην εξωτερική του επιφάνεια.

Ορισμός Παραμέτρων Τρεξίματος:

Επόμενο στάδιο είναι ο καθορισμός των παραμέτρων τρεξίματος (Run parameters), που αφορούν την προσομοίωση και τον τρόπο διεξαγωγής της. Αναφέρονται στο γενικό πρόβλημα, καθώς και στην επίλυση του ροϊκού και θερμικού προβλήματος. Πιο συγκεκριμένα θέσαμε της κατάλληλες για το πείραμα μας τιμές στα εξής μεγέθη:

Εικόνα 4. 16 Ορισμός των γενικών παραμέτρων τρεξίματος

Εικόνα 4. 17 Ορισμός των θερμικών παραμέτρων τρεξίματος

Εικόνα 4. 18 Ορισμός των ροϊκών παραμέτρων τρεξίματος

Από τις παραμέτρους που φαίνονται παραπάνω μπορούμε να ξεχωρίσουμε μερικές που επηρεάζουν σημαντικά τη διαδικασία της προσομοίωσης:

- **NSTEP: Maximum number of steps**

Καθορίζει το μέγιστο αριθμό βημάτων που θα εκτελεστούν και λειτουργεί σε συνδυασμό με την παράμετρο TFINAL που ορίζει το χρόνο διεξαγωγής της χύτευσης. Η προσομοίωση ολοκληρώνεται όταν ένα από τα δυο μεγέθη φτάσει στην ανώτατη τιμή του.

- **THERMAL:**

Ορίζει τη θερμική ανάλυση του προβλήματος και δέχεται τις εξής τιμές:

0 → δεν πραγματοποιείται καμία θερμική ανάλυση

1 → πραγματοποιείται θερμική ανάλυση θεωρώντας τη θερμοκρασία σαν κύρια μεταβλητή

2 → πραγματοποιείται θερμική ανάλυση θεωρώντας την ενθαλπία σαν κύρια μεταβλητή.

- **FLOW: Flow model activation**

Αφορά την επίλυση ή όχι του ροϊκού προβλήματος κατά την απόχυση του ρευστού μετάλλου. Οι τιμές που μπορούμε να εισάγουμε είναι:

0 → δεν γίνεται επίλυση

1 → γίνεται γενική λύση του ροϊκού προβλήματος

3 → πραγματοποιείται η επίλυση των ροϊκών εξισώσεων μόνο κατά την πλήρωση του καλουπιού, ενώ μετά την πλήρωση λύνεται μόνο το θερμικό πρόβλημα.

- **FREESF: Free surface model activation**

Είναι η παράμετρος που καθορίζει το είδος της ελεύθερης επιφάνειας που δημιουργείται κατά την πλήρωση του καλουπιού και δέχεται τις παρακάτω τιμές:

0 → δεν έχουμε δημιουργία ελεύθερης επιφάνειας

1 → χρησιμοποιείται η στιγμιαία σχηματιζόμενη ελεύθερη επιφάνεια λόγω ταχείας πλήρωσης του τύπου

2 → για περιπτώσεις αργής πλήρωσης όπου η ελεύθερη επιφάνεια οφείλεται στην επίδραση της βαρύτητας.

- **POROS: Porosity model activation**

Καθορίζει τους υπολογισμούς που θα πραγματοποιηθούν για το πορώδες και δέχεται τις τιμές:

0 → δεν γίνεται υπολογισμός πορώδους

1 → εξελιγμένο μοντέλο υπολογισμών (μικροπορώδες, μακροπορώδες, συστολή λόγω συρρίκνωσης)

4 → υπολογισμός για πολλαπλές ελεύθερες επιφάνειες (εξέλιξη του POROS=8)

8 → παλιό μοντέλο υπολογισμών, από παλιότερες εκδόσεις του προγράμματος

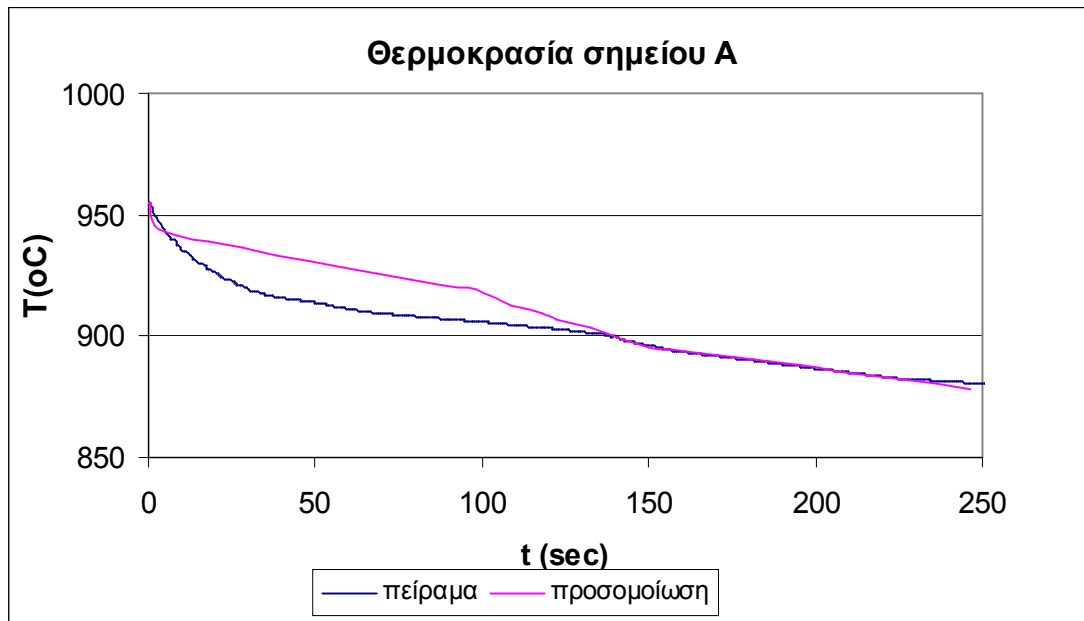
5.1.3. 4.1.3 Εύρεση του Συντελεστή Μετάδοσης Θερμότητας

Η διαδικασία εύρεσης του Συντελεστή Μετάδοσης Θερμότητας (Σ.Μ.Θ) μέσω του προγράμματος PROCAST, γίνεται πραγματοποιώντας συνεχείς προσομοιώσεις για διάφορες τιμές του Σ.Μ.Θ με δεδομένα αυτά που περιγράφονται στην παράγραφο 4.1.2. Ο τρόπος αυτός αποτελεί τη λύση του ευθέως προβλήματος, που απαιτεί ως δεδομένα, τη γεωμετρία, τις αρχικές συνθήκες, τις συνοριακές συνθήκες και το Σ.Μ.Θ. Πιο συγκεκριμένα η διαδικασία “trial and error” που ακολουθήθηκε, γινόταν διατηρώντας σταθερές όλες τις συνθήκες της προσομοίωσης εκτός από το Σ.Μ.Θ στη διεπιφάνεια καλουπιού – μετάλλου. Μετά το πέρας κάθε προσομοίωσης γινόταν σύγκριση της καμπύλης απόψυξης της, με την πειραματική (Σχ.4.1). Η διαδικασία λάμβανε τέλος, όταν επιτυγχάναμε ικανοποιητική σύγκλιση των δυο καμπυλών. Αρχικά έγιναν δοκιμές χρησιμοποιώντας σταθερούς συντελεστές από $10 \text{ W/m}^2\text{K}$ έως $3000 \text{ W/m}^2\text{K}$.

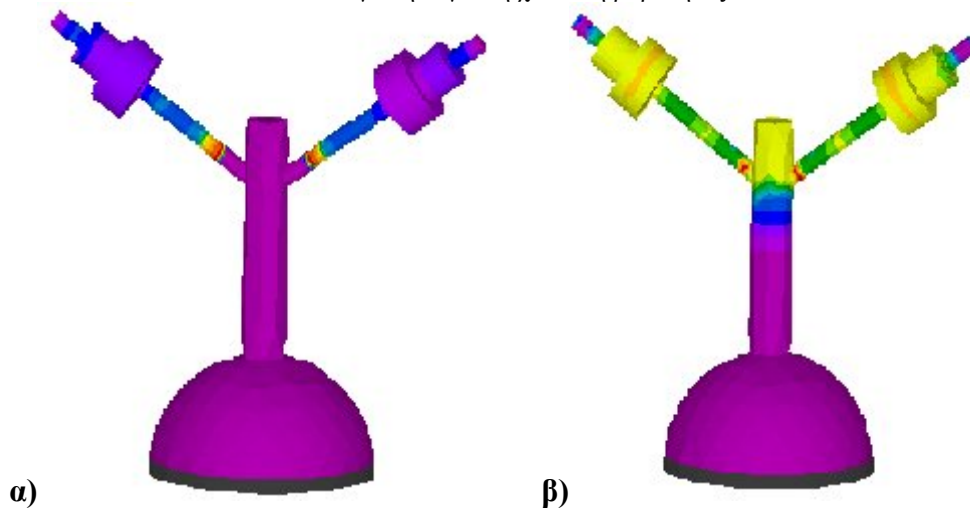
Όμως, τα αποτελέσματα δεν ικανοποιούν επαρκώς την καμπύλη απόψυξης του πειράματος και για αυτό πρέπει να γίνουν νέες δοκιμές με μεταβλητούς συντελεστές έως ότου επέλθει ικανοποιητική σύγκλιση των δύο καμπυλών. Έτσι, έπειτα από συνεχείς προσομοιώσεις βρέθηκε ο παρακάτω Σ.Μ.Θ:

$$h = \begin{cases} 1500 \text{ W/m}^2\text{K}, & 0 < t < 2\text{sec} \\ 3200 \text{ W/m}^2\text{K}, & 2 < t < 120\text{sec} \\ 100 \text{ W/m}^2\text{K}, & t \geq 120\text{sec} \end{cases}$$

τα αποτελέσματα του οποίου φαίνονται στο διάγραμμα 4.2.



Διάγραμμα 4. 2 Η σύγκλιση της πειραματικής και της καμπύλης προσομοίωσης, για το Σ.Μ.Θ που υπολογίστηκε για τη χύτευση βαρύτητας.



Εικόνα 4. 19 α) Ο χρόνος στερεοποίησης και β) το ποσοστό πορώδους του χυτού για τον Σ.Μ.Θ που υπολογίστηκε.

5.1.4. 4.1.4 Περιγραφή του Inverse modeling

Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 2, υπάρχουν δυο τρόποι εύρεσης του Σ.Μ.Θ. ο πρώτος, ο οποίος είναι αυτός που χρησιμοποιήσαμε στην προηγούμενη παράγραφο, προκύπτει από τη λύση του ευθέως προβλήματος και απαιτεί ως δεδομένα (εισόδους) τα εξής:

- Τη γεωμετρία του μοντέλου
- Τις θερμοφυσικές ιδιότητες του υλικού (h , k , latent heat κλπ)
- Αρχικές συνθήκες
- Συνοριακές συνθήκες

Έτσι σαν αποτέλεσμα (έξοδος) παράγονται καμπύλες απόψυξης μέσω των οποίων προσδιορίζουμε το Σ.Μ.Θ.

Αντίθετα, με τον δεύτερο τρόπο εύρεσής του, απαιτείται σα δεδομένο η θερμοκρασιακή μεταβολή, έχοντας ως αποτέλεσμα είτε τις θερμοφυσικές ιδιότητες του υλικού είτε τις συνοριακές συνθήκες. Η διαδικασία αυτή είναι γνωστή και ως λύση του Αντίστροφου Θερμικού Προβλήματος (Inverse Modeling). Για να μπορούμε να εισάγουμε τη θερμοκρασιακή μεταβολή σαν είσοδο στο σύστημα, πρέπει να εκτελέσουμε πειράματα στη μηχανή χύτευση με θερμοστοιχεία στα σημεία που μας ενδιαφέρει να έχουμε γνώση του Σ.Μ.Θ. Να σημειώσουμε πως κατά την επίλυση του Αντίστροφου Προβλήματος μπορούμε να έχουμε μια μόνο έξοδο κάθε φορά και όχι π.χ και το h και την αρχική θερμοκρασία καλουπιού.

Το μαθηματικό μοντέλο επίλυσης του Inverse Modeling, είναι μια εξίσωση ελαχίστων τετραγώνων, της μορφής:

$$S(\beta) = \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \frac{1}{\sigma_{\tau}^2} [T_{ij}^{\infty} - T_{ij}^c(\beta)]^2 + \sum_{\kappa=1}^{N_{\beta}} \frac{1}{\sigma_{\kappa}^2} [\beta_{\kappa} - \beta_{\kappa}^o]^2 \quad (4.1)$$

Όπου:

N : ο αριθμός των θερμοστοιχείων που τοποθετήσαμε

χ_j : οι θέσεις των θερμοστοιχείων $j=1, \dots, N$

t_i : οι χρόνοι μέτρησης των θερμοστοιχείων, $i=1, \dots, Nt$

T_{ij}^{∞} : η πραγματική θερμοκρασία (του πειράματος) που μετρήθηκε στη θέση j τη χρονική στιγμή i

$T_{ij}^c(\beta)$: η θερμοκρασία που υπολογίστηκε από την προσομοίωση, στη θέση j τη χρονική στιγμή i

σ_{τ} : η τυπική απόκλιση, που σχετίζεται με το πειραματικό σφάλμα μέτρησης

σ_{κ} : η τυπική απόκλιση που σχετίζεται με το εύρος που επιτρέπεται να διαφέρει η παράμετρος β_{κ} από την προκαθορισμένη παράμετρο β_{κ}^0

Η παράμετρος $\beta = \{\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_{N_{\beta}}\}$ είναι αυτή που πρέπει να προσδιοριστεί, ώστε η $S(\beta)$ να γίνει ελάχιστη, και μπορεί να αναπαριστά είτε μια θερμοφυσική ιδιότητα είτε κάποια συνοριακή συνθήκη.

Για να ελαχιστοποιήσουμε την $S(\beta)$, έχουμε:

$$\frac{\partial S}{\partial \beta_{\kappa}} = \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} \frac{-2}{\sigma_{\tau}^2} \left[T_{ij}^{\infty} - T_{ij}^c(\beta) \right] X_{ij} + \frac{2}{\sigma_{\kappa}^2} \left[\beta_{\kappa} - \beta_{\kappa}^0 \right] = 0 \quad (2.2)$$

όπου X_{ij} είναι ο συντελεστής ευαισθησίας και ισούται με :

$$X_{ij} = \frac{\partial T_{ij}^c(\beta)}{\partial \beta_{\kappa}} \approx \frac{\partial T_{ij}^c(\beta_1, \dots, \beta_{\kappa} + \delta\beta_{\kappa}, \dots, \beta_{N_{\beta}}) - \partial T_{ij}^c(\beta_1, \dots, \beta_{\kappa}, \dots, \beta_{N_{\beta}})}{\delta\beta_{\kappa}} \quad (2.3)$$

όπου $\delta\beta_{\kappa}$ είναι η προκαθορισμένη διαφορά της παραμέτρου β_{κ} .

Είναι φανερό, από τις παραπάνω σχέσεις, ότι για τον υπολογισμό των T_{ij}^c είναι αναγκαία η λύση του ευθέως προβλήματος. Έτσι αν έχουμε π.χ. N αγνώστους και M εξισώσεις, απαιτούνται $(N+1)$ ευθείς υπολογισμοί. Για το λόγο αυτό, ο υπολογισμός του Αντίστροφου προβλήματος, αυξάνεται υπερβολικά. Συνιστάται λοιπόν, για τον περιορισμό του υπολογιστικού χρόνου, η χρήση 2D μοντέλων ή πολύ απλών μορφών χυτών. Είναι σαφές λοιπόν, πως για πραγματικά χυτά με περισσότερους από έναν αγνώστους (π.χ. h και k), η χρήση του Inverse Modeling είναι πρακτικά αδύνατη.

5.1.5. 4.1.5 Μελέτη επίδρασης παραμέτρων της Χύτευσης Βαρύτητας στην ποιότητα του χυτού, για Direct Modeling:

Στο κεφάλαιο αυτό θα εξετάσουμε την επίδραση των δύο βασικών παραμέτρων της διαδικασίας χύτευσης σε μηχανή βαρύτητας, της θερμοκρασίας του τήγματος (T_{metal}) και του τύπου (T_{mold}), τόσο στο χρόνο στερεοποίησης, όσο και στο δημιουργούμενο πορώδες.

1. Επίδραση του T_{metal} :

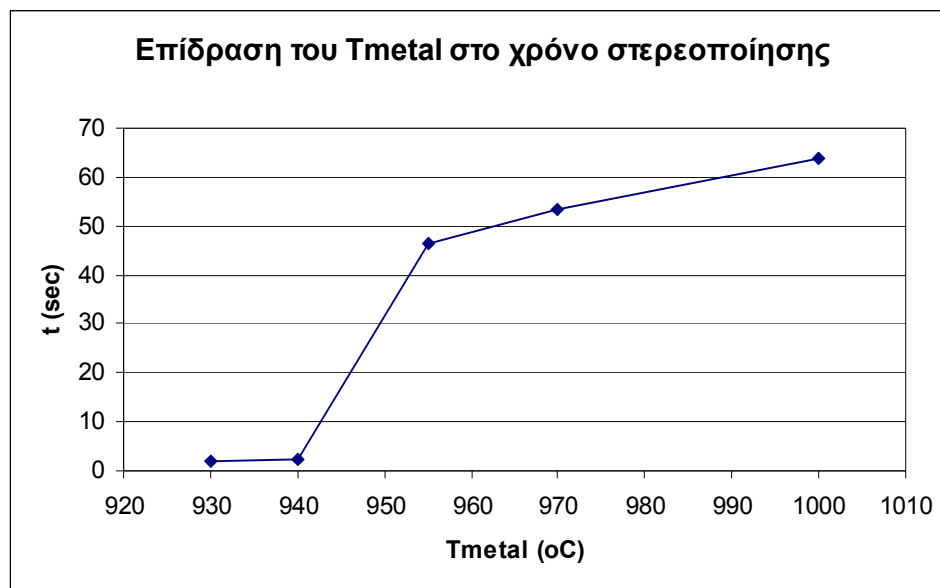
ι) Στο Χρόνο Στερεοποίησης:

Όπως διακρίνεται στον Πίνακα 4.1, πραγματοποιήσαμε προσομοιώσεις, διατηρώντας σταθερές όλες τις παραμέτρους χύτευσης, μεταβάλλοντας μόνο την αρχική θερμοκρασία του μετάλλου. Τα αποτελέσματα που είχαμε φαίνονται παρακάτω:

Πίνακας 4. 1 Η μεταβολή του χρόνου στερεοποίησης για διάφορες θερμοκρασίες τήγματος, στη χύτευση βαρύτητας.

T_{metal} (°C)	Solidification time (sec)
930	1.9
940	2.3
955	46.6
970	53.5
1000	64.0

Όπως ήταν αναμενόμενο ο χρόνος στερεοποίησης, αυξάνεται όσο μεγαλώνει η θερμοκρασία εισαγωγής του μετάλλου, αφού απαιτείται περισσότερος χρόνος για την απόψυξή του.



Διάγραμμα 4. 3 Η μεταβολή του χρόνου στερεοποίησης συναρτήσει της αρχική θερμοκρασία τήγματος.

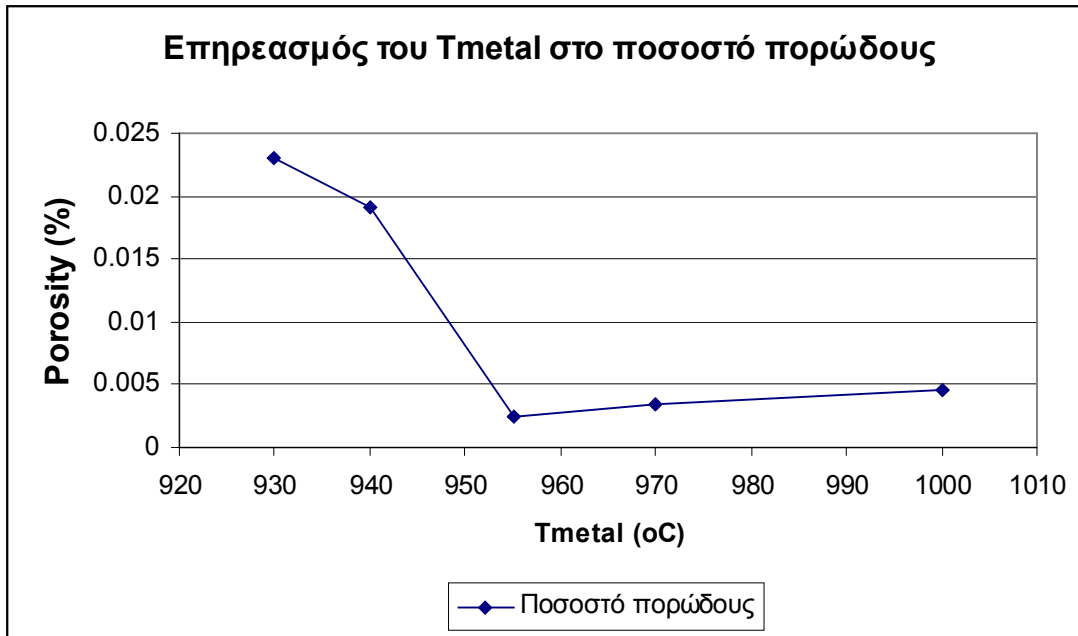
ii) Στο ποσοστό πορώδους:

Οι προσομοιώσεις που έγιναν για διάφορες αρχικές θερμοκρασίες τήγματος είχαν τα ακόλουθα αποτελέσματα:

Πίνακας 4. 2 Η μεταβολή του πορώδους σε σύγκριση με τη θερμοκρασία τήγματος για τη χύτευση βαρύτητας.

T _{metal} (°C)	Porosity (%)	Δporosity (%)
930	0.0231	
940	0.0191	-17.0
955	0.00248	-89.0
970	0.00343	-85.0
1000	0.0046	-80.0

Από τον Πίνακα 4.2 παρατηρούμε ότι, το ποσοστό πορώδους δεν ακολουθεί ανάλογη πορεία με την αύξηση της θερμοκρασία τήγματος, εμφανίζοντας όμως σημαντική μείωση μετά τους 955 °C.



Διάγραμμα 4. 4 Η αναπαράσταση της μεταβολής του πορώδους συναρτήσει του Tmetal, στη χύτευση βαρύτητας

2. Επίδραση του Tmold:

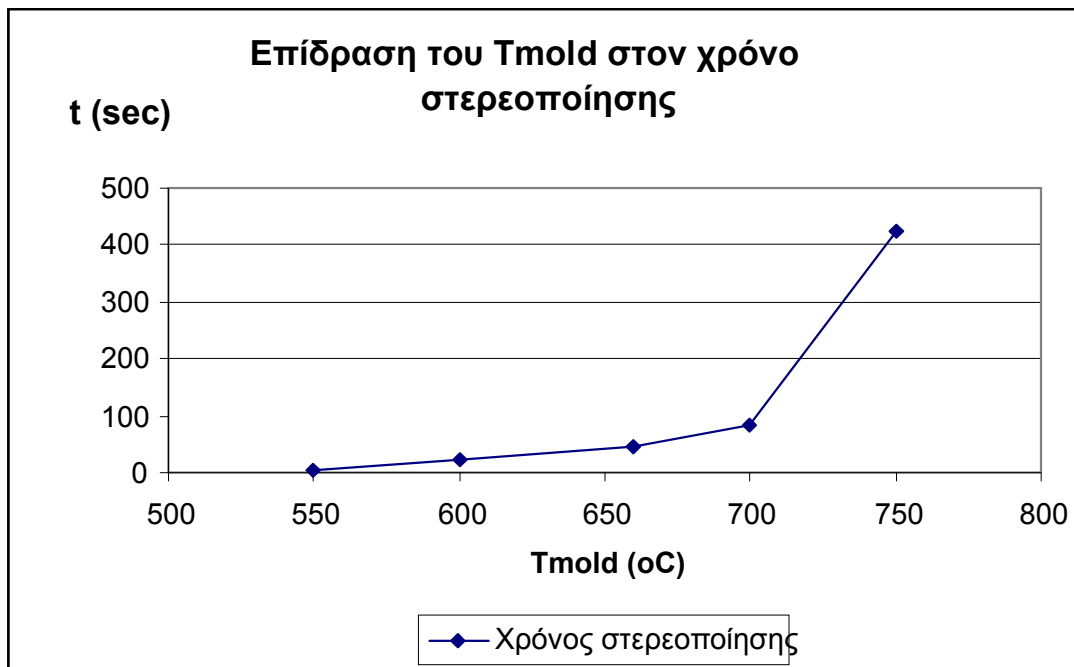
ι) Στο Χρόνο Στερεοποίησης:

Σε αυτήν την περίπτωση, οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν, μεταβάλλοντας μόνο τη θερμοκρασία του τύπου και διατηρώντας τα υπόλοιπα μεγέθη σταθερά. Για τη μεταβολή του χρόνου στερεοποίησης έχουμε τον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 4. 3 Η μεταβολή του χρόνου στερεοποίησης του χυτού, συναρτήσει της θερμοκρασίας καλουπιού, στη χύτευση βαρύτητας

Tmold (°C)	Solidification time (sec)
550	5.2
600	24
660	46.6
700	85.2
750	425.3

Και σε αυτήν την περίπτωση ο χρόνος στερεοποίησης μεγαλώνει με την αύξηση της θερμοκρασίας του καλουπιού, αφού η αυξημένη θερμοκρασία του επιβραδύνει τη μεταφορά θερμότητας από το τήγμα προς το περιβάλλον.



Διάγραμμα 4. 5 Ο τρόπος επίδρασης της θερμοκρασίας καλουπιού στο χρόνο στερεοποίησης, στη χύτευση βαρύτητας

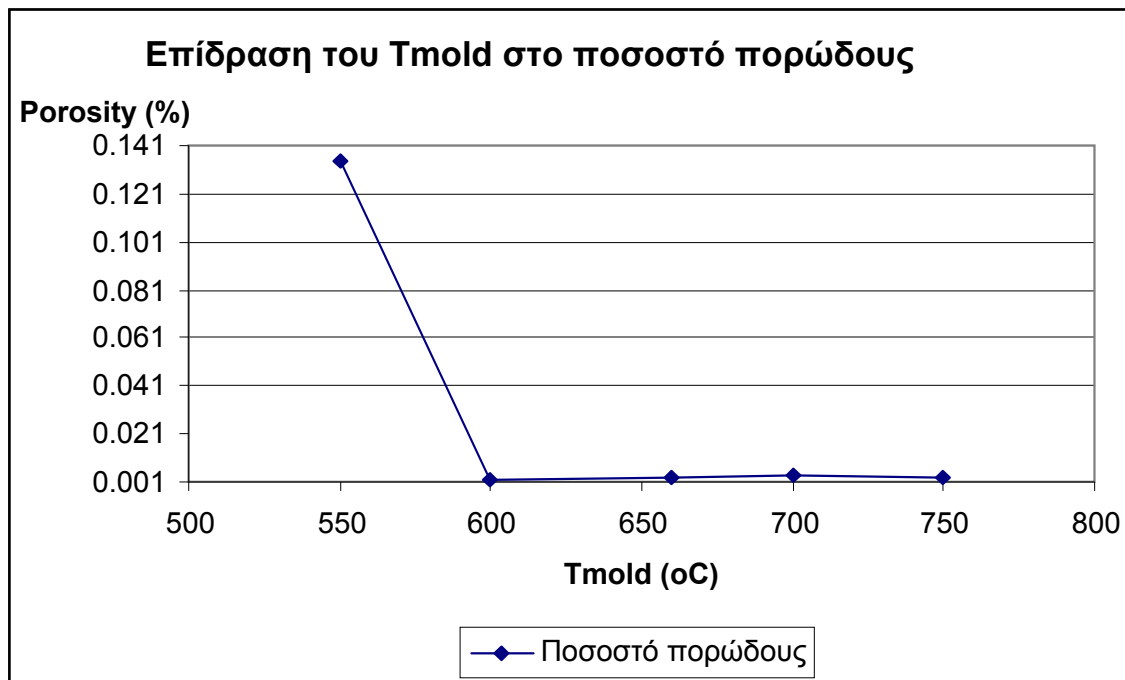
ii) Στο ποσοστό πορώδους:

Η μεταβολή της θερμοκρασίας καλουπιού, επέφερε τις παρακάτω αλλαγές, στο ποσοστό πορώδους του χυτού:

Πίνακας 4. 4 Η μεταβολή του πορώδους, ανάλογα με την αρχικής θερμοκρασία καλουπιού, στη χύτευση βαρύτητας

Tmold (°C)	Porosity (%)	Δporosity (%)
550	0.1343	
600	0.0017	-98.15
660	0.00248	-97.14
700	0.00384	-97.81
750	0.00294	-98.73

Αξίζει να σημειωθεί το αρκετά μεγάλο ποσοστό πορώδους για $T_{\text{mold}}=550\text{ }^{\circ}\text{C}$, που ωστόσο μειώνεται σημαντικά για μεγαλύτερες θερμοκρασίες, το οποίο οφείλεται στη μικρότερη θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ καλουπιού και μετάλλου.



Διάγραμμα 4. 6 Η επίδραση της θερμοκρασίας καλουπιού, στο πορώδες του χυτού, για τη χύτευση βαρύτητας

5.2. 4.2 Φυγοκεντρική χύτευση

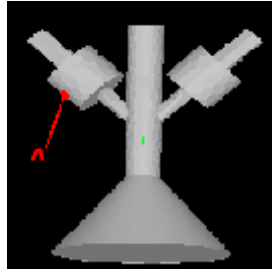
5.3.

5.3.1. 4.2.1 Εκτέλεση πειραμάτων φυγοκεντρικής χύτευσης

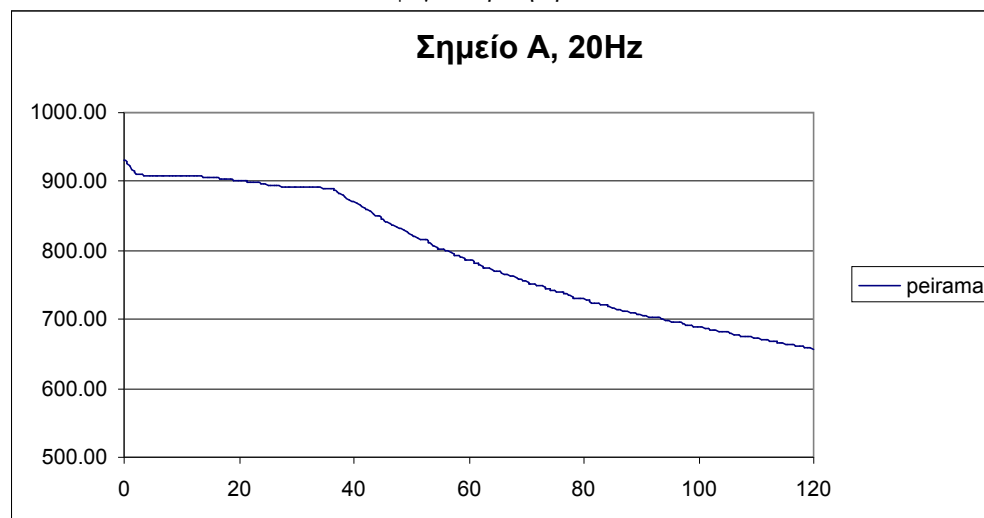
Οι δυνατότητες ρύθμισης της φυγοκεντρικής μηχανής είναι αρκετές και έγινε προσπάθεια να μελετηθούν όλες, ώστε να διαπιστωθεί ο ρόλος τους στη διαδικασία στερεοποίησης. Οι δυνατότητες ελέγχου που έχουμε είναι:

1. Της ταχύτητας περιστροφής του καλουπιού: από 0 Hz έως 60 Hz (0 RPM έως 470 RPM). Να σημειώσουμε ότι η ονομαστική ταχύτητα περιστροφής του ηλεκτροκινητήρα είναι 50Hz και με επέμβαση στην κεντρική μονάδα ελέγχου (PLL), θέσαμε ανώτατη ταχύτητα τα 60Hz.
2. Του χρόνου περιστροφής: από 0 min έως 5 min.
3. Της επιτάχυνσης της μηχανής, που είναι ο χρόνος που απαιτείται για να επιτευχθεί η μέγιστη ταχύτητα περιστροφής που έχουμε ορίσει (Ramp-up time): από 0 sec έως 650 sec.
4. Της παροχής μετάλλου, η οποία δεν ελέγχεται άμεσα, αλλά είναι συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής.

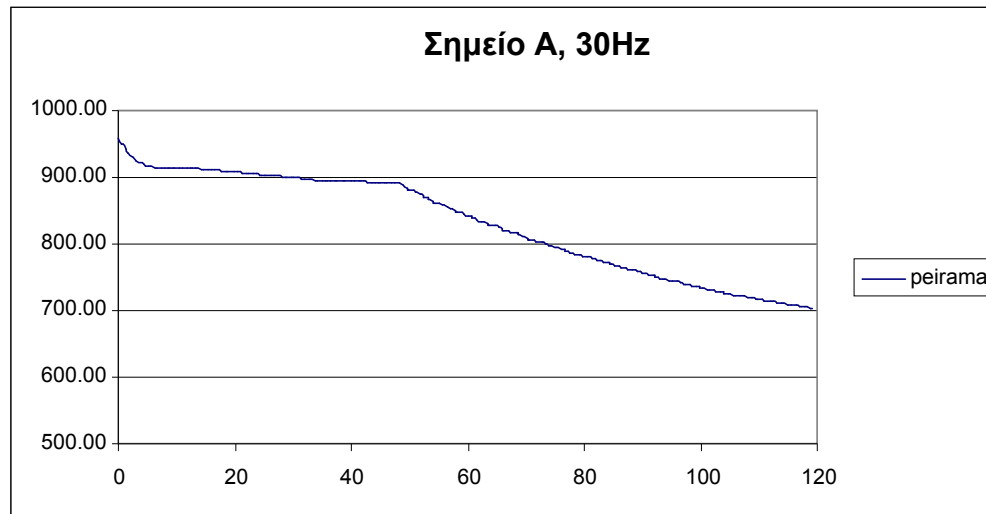
Υπολογίζοντας τις παραπάνω παραμέτρους εκτελέστηκαν πειράματα για την εύρεση του συντελεστή μετάδοσης θερμότητας, τόσο στον χυτό, όσο και στον κεντρικό αγωγό τροφοδοσίας. Επιπλέον θεωρώντας την ταχύτητα περιστροφής καθοριστική παράμετρο, έγιναν πειράματα και για τις δυο προαναφερθείσες θέσεις για ταχύτητες 20Hz, 30Hz, 40Hz, 50Hz και 60Hz. Από τις δοκιμαστικές διαδικασίες χύτευσης που εκτελέσαμε παρατηρήθηκε η αδυναμία επιτυχούς απόχυσης του τήγματος στην κοιλότητα του καλουπιού για ταχύτητα περιστροφής 10Hz. Τα αποτελέσματα από τα πειράματα που έγιναν με τοποθέτηση θερμοστοιχείων για κάθε θέση και ταχύτητα περιστροφής, φαίνονται παρακάτω:

1. Μέτρηση Σ.Μ.Θ στο γυτό: Σημείο Α

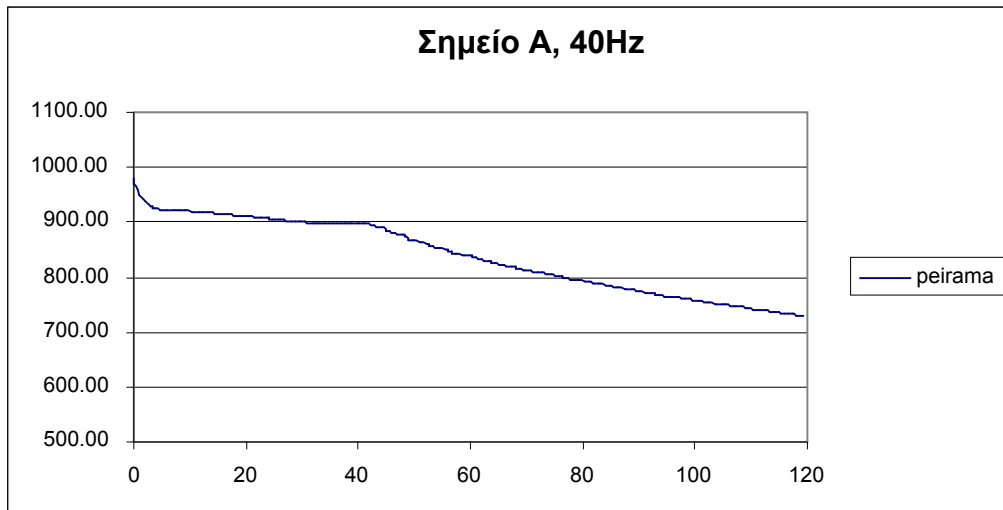
Εικόνα 4. 20 Το σημείο μέτρησης της θερμοκρασία του χυτού, κατά την εκτέλεση των πειραμάτων με φυγικεντρική πρέσα.



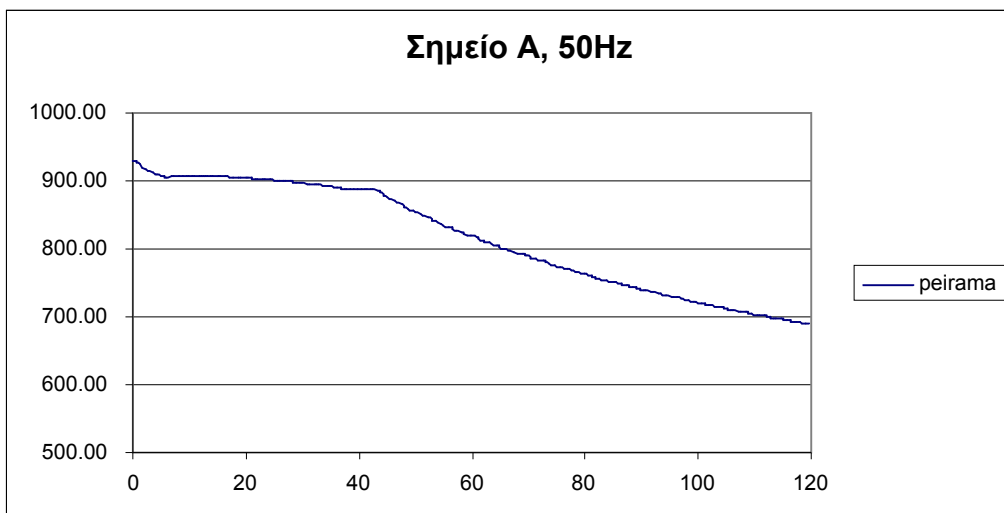
Διάγραμμα 4. 7 Οι πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασίας, για ταχύτητα περιστροφής 20Hz στο σημείο Α.



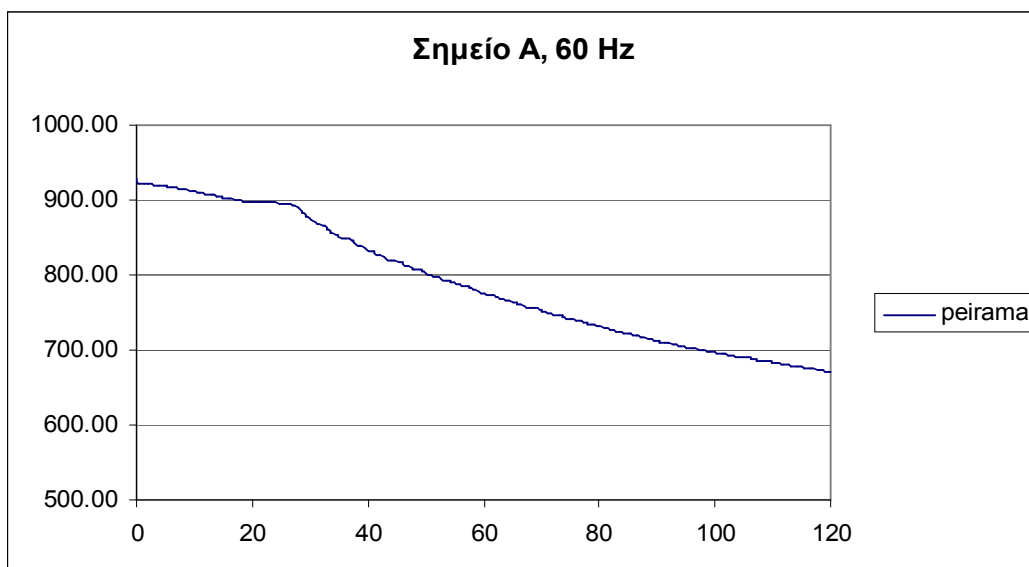
Διάγραμμα 4. 8 Οι πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασίας, για ταχύτητα περιστροφής 30Hz στο σημείο A.



Διάγραμμα 4. 9 Οι πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασίας, για ταχύτητα περιστροφής 40Hz στο σημείο A.



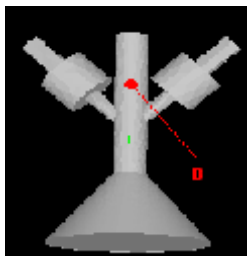
Διάγραμμα 4. 10 Οι πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασίας, για ταχύτητα περιστροφής 50Hz στο σημείο Α.



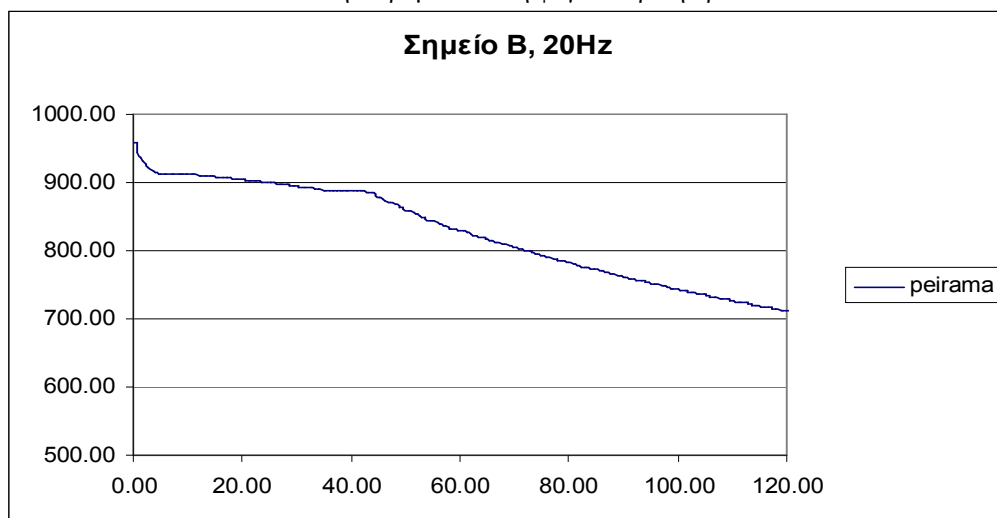
Διάγραμμα 4. 11 Οι πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασίας, για ταχύτητα περιστροφής 60Hz στο σημείο Α.

Από τα παραπάνω διαγράμματα διαπιστώνουμε την ύπαρξη τριών περιοχών μεταβολής του Σ.Μ.Θ. Επίσης διακρίνεται εκ πρώτης όψεως, μεγαλύτερη κλίση στις καμπύλες καθώς αυξάνεται η ταχύτητα περιστροφής γεγονός που οδηγεί σε ταχύτερη απόψυξη του χυτού.

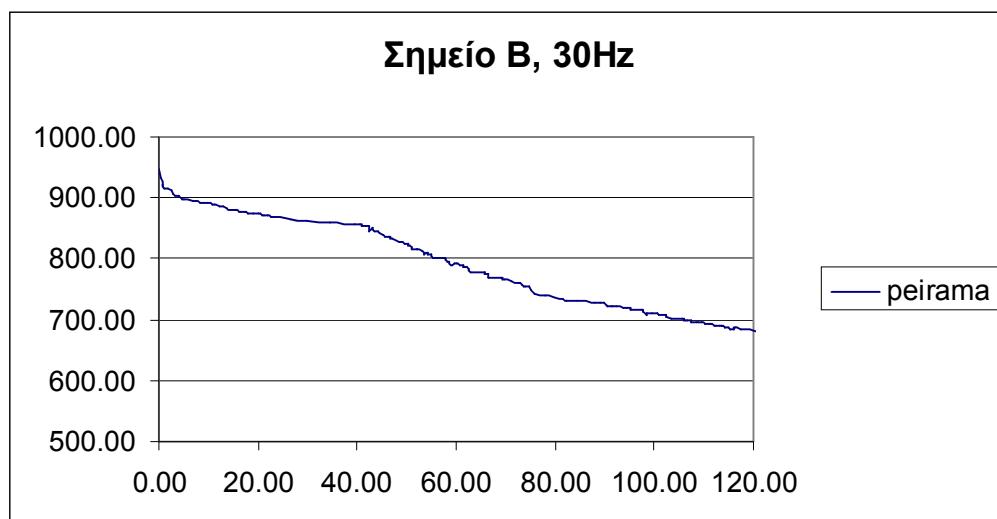
2. Μέτρηση Σ.Μ.Θ στον κεντρικό αγωγό: Σημείο Β



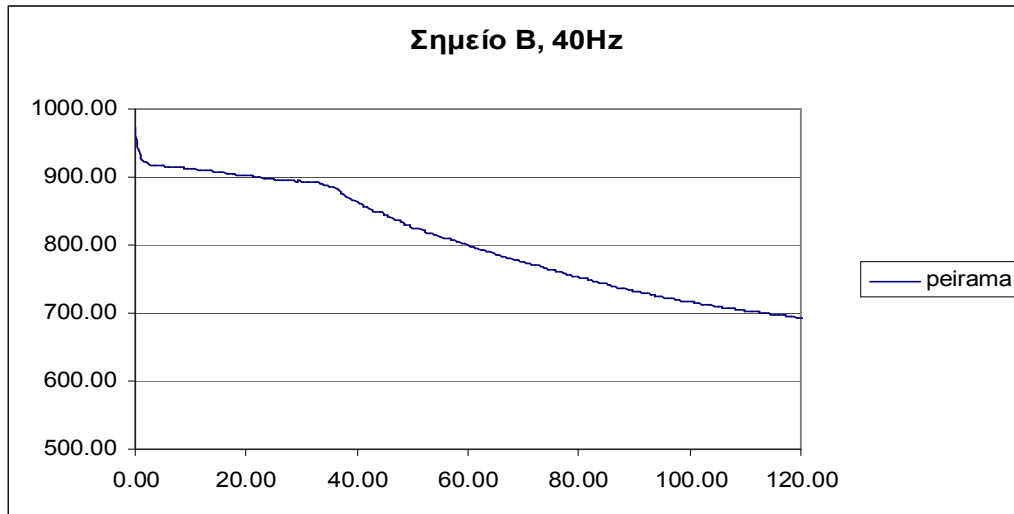
Εικόνα 4. 21 Το σημείο τοποθέτησης του θερμοστοιχείου, στον κεντρικό αγωγό τροφοδοσίας, κατά την εκτέλεση πειραμάτων στη φυγοκεντρική πρέσα.



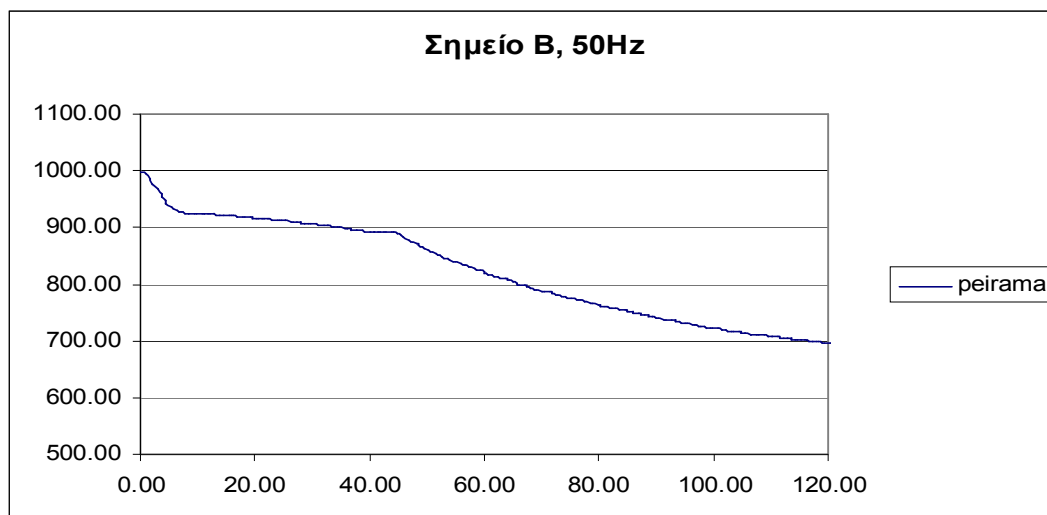
Διάγραμμα 4. 12 Οι πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασίας, για ταχύτητα περιστροφής 20Hz στο σημείο B.



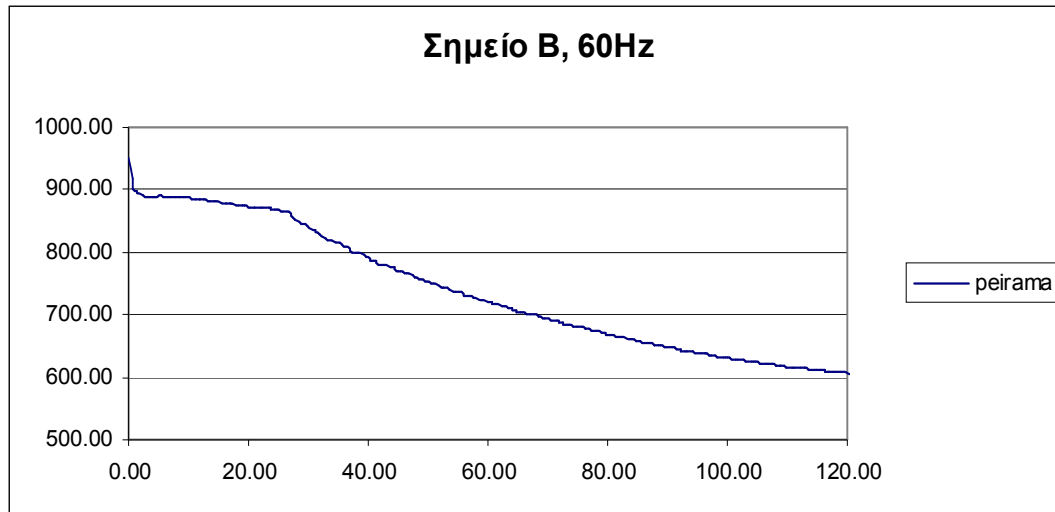
Διάγραμμα 4. 13 Οι πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασίας, για ταχύτητα περιστροφής 30Hz στο σημείο B.



Διάγραμμα 4. 14 Οι πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασίας, για ταχύτητα περιστροφής 40Hz στο σημείο B.



Διάγραμμα 4. 15 Οι πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασίας, για ταχύτητα περιστροφής 50Hz στο σημείο B.



Διάγραμμα 4. 16 Οι πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασίας, για ταχύτητα περιστροφής 60Hz στο σημείο B.

Και στις μετρήσεις για το σημείο του κορμού είναι φανερή η μεταβολή του Σ.Μ.Θ σε τρεις φάσεις καθώς και η αύξηση της κλίσης των καμπυλών καθώς αυξάνεται η ταχύτητα περιστροφής.

5.3.2. 4.2.2 Περιγραφή του τρόπου προσομοίωσης της φυγοκεντρικής χύτευσης

Για την προσομοίωση της χύτευσης με τη φυγοκεντρική χυτόπρεσα, ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία σχεδίασης του μοντέλου στο module MeshCast του PROCAST. Η διαφορά με το μοντέλο της μηχανής βαρύτητας βρίσκεται στις διαστάσεις, όπως περιγράφονται και στο 3^ο Κεφάλαιο.

Και εδώ η σχεδίαση έγινε σταδιακά, ξεκινώντας από τον κεντρικό αγωγό, συνεχίζοντας με τη φούσκα και καταλήγοντας στο τεμάχιο χύτευσης το οποίο περιστρέψαμε γύρω από τον κεντρικό αγωγό. Στο τέλος σχεδιάστηκε και το κυλινδρικό καλούπι με διάμετρο βάσης 8 cm και ύψος 12 cm.

Μετά τη σχεδίαση του μοντέλου, σειρά έχει ο καθορισμός των αρχικών και συνοριακών συνθηκών, στο module PreCast.

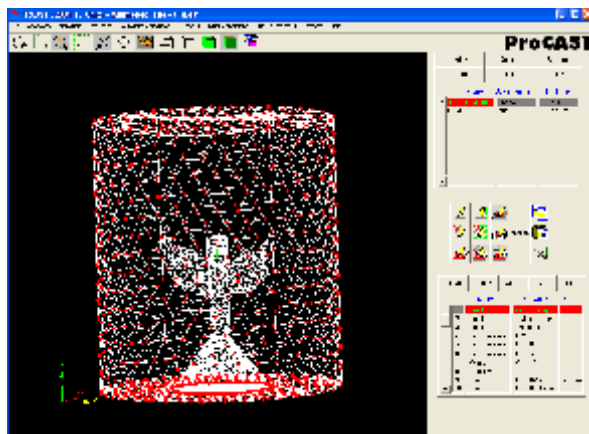
Στην καρτέλα των “Materials” επιλέγουμε σαν υλικό του χυτού, το κράμα Cu70Zn30 το οποίο είχαμε δημιουργήσει για τη χύτευση βαρύτητας και διαθέτει τις ίδιες ακριβώς ιδιότητες (σύσταση, πυκνότητα, θερμοχωρητικότητα, θερμοκρασίας τήξης, θερμοκρασία στερεοποίησης, λανθάνουσα θερμότητα κτλ). Επίσης ορίσαμε ως υλικό του τύπου, τον γύψο. Στην καρτέλα “ Interface” επιλέγουμε το συντελεστή μετάδοσης θερμότητας στη διεπιφάνεια χυτού και καλουπιού. Εξαιτίας του ότι είναι ένα μέγεθος που πρέπει να υπολογίσουμε, δε δώσαμε συγκεκριμένη τιμή.

Συνεχίζοντας, στην καρτέλα των “Boundary Conditions”, ορίσαμε τα ακόλουθα:

Ορισμός συνοριακών συνθηκών:

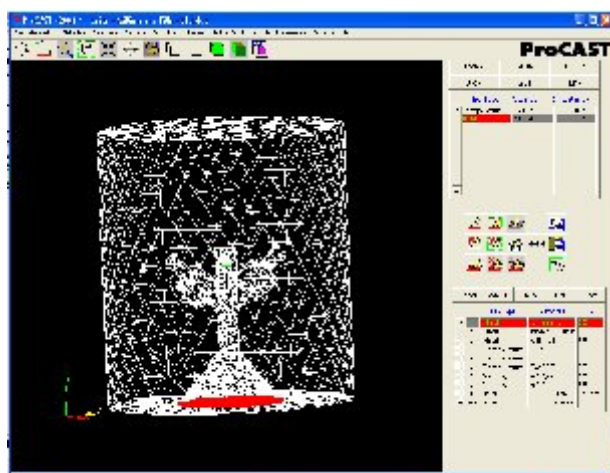
- **Θερμοκρασία καλουπιού, πριν την είσοδο του τήγματος : 550 °C**

Στην εικόνα 4.22 φαίνονται και οι κόμβοι στους οποίους αντιστοιχεί η θερμοκρασία αυτή, οι οποίοι αντιστοιχούν σε όλον τον όγκο του καλουπιού



Εικόνα 4. 22 Η απόδοση της αρχικής θερμοκρασίας καλουπιού, στους αντίστοιχους κόμβους, του μοντέλου της φυγοκεντρικής χύτευσης.

- **Θερμοκρασία τήγματος, κατά την είσοδό του στο καλούπι:** 940 °C
Παρακάτω διακρίνονται και οι ανάλογοι κόμβοι.



Εικόνα 4. 23 Ο ορισμός της αρχικής θερμοκρασία τήγματος στους κόμβους που αντιστοιχεί.

- **Παροχή μάζας τήγματος,** η οποία ήταν μεταβλητή, ανάλογα με την ταχύτητα περιστροφής του καλουπιού.

Πίνακας 4. 5 Η μεταβολή της παροχής του μετάλλου, ανάλογα με την ταχύτητα περιστροφής της φυγοκεντρικής μηχανής.

Hz	Παροχή τήγματος(kg/sec)
20	0.280
30	0.345
40	0.400
50	0.450

60

0.490

Η παροχή μάζας υπολογίστηκε από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\dot{m} = Q * \rho \quad (4.1)$$

Όπου:

$$Q = v * A \quad (4.2) \text{ με,}$$

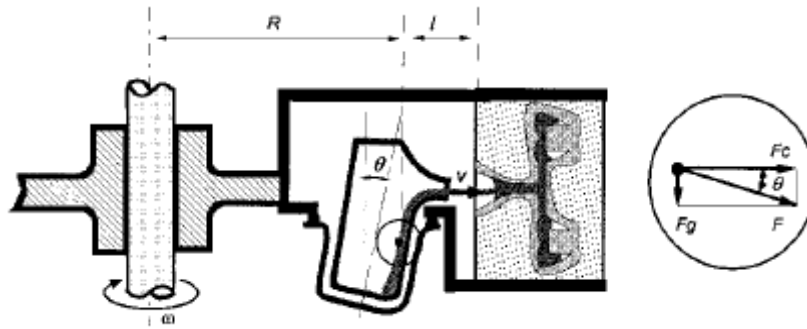
$$A = \pi R^2 = \frac{\pi(0,008)^2}{4} = 0.00005 \text{ m}^2 \quad (4.3)$$

$\rho_{\text{ΟΡΕΙΧΑΛΚΟΥ}} = 7,7 * 10^3 \text{ kg/m}^3$ σε θερμοκρασία 930°C

$$v = \sqrt{2l\alpha_R} \quad (4.4) \text{ με,}$$

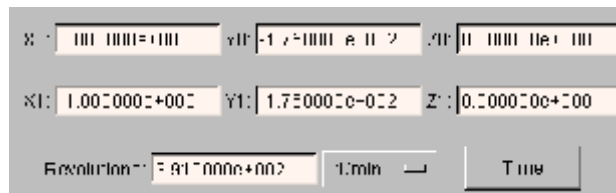
$$\alpha_R = \omega^2 * R$$

τα παραπάνω διακρίνονται και στο ακόλουθο σχήμα:

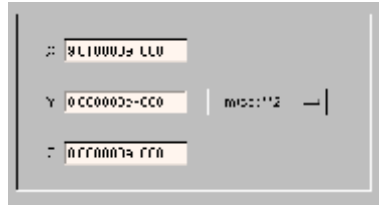


Σχήμα 4.1: Βασικά μεγέθη της φυγοκεντρικής χύτευσης

Σειρά έχει ο καθορισμός της διαδικασίας χύτευσης και του διανύσματος βαρύτητας, από την καρτέλα “Process”. Έτσι, ορίσαμε $g=9.81 \text{ m/sec}^2$ προς τα θετικά του άξονα των X και ως διαδικασία χύτευσης, θέσαμε “Revolution” στην οποία απαιτείται ο ορισμός του άξονα περιστροφής και της ταχύτητας περιστροφής του καλουπιού, που μεταβαλλόταν στην εκτέλεση των πειραμάτων, από 20Hz έως 60Hz.



Εικόνα 4. 24 Ορισμός του άξονα περιστροφής του καλουπιού, της ταχύτητας



Εικόνα 4. 25 Ορισμός του διανύσματος βαρύτητας.

Η δυνατότητα περιστροφής της φυγοκεντρικής χυτόπρεσας, είναι από 0 Hz-60 Hz. Από τα στοιχεία του κατασκευαστή για τη διάμετρο των τροχαλιών και τις μέγιστες στροφές του ηλεκτροκινητήρα της μηχανής, προκύπτει η ακόλουθη αντιστοιχία Hz και R.P.M, η οποία οριζόταν κάθε φορά σαν παράμετρος της προσομοίωσης:

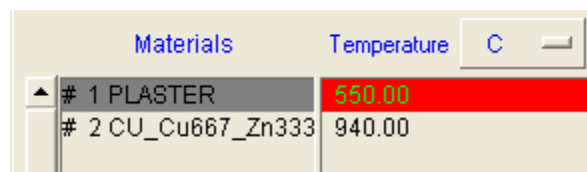
Πίνακας 4. 6 Η αντιστοιχία Hz-R.P.M της ταχύτητας περιστροφής της φυγοκεντρικής πρέσας.

Hz	R.P.M
20	156.4
30	234.6
40	312.8
50	391.6
60	469.2

Ορισμός Αρχικών Συνθηκών:

Στον προσδιορισμό των Αρχικών Συνθηκών , Initial Conditions, ορίζουμε τις αρχικές θερμοκρασίες τήγματος και καλουπιού, οι οποίες πρέπει να είναι ίδιες με αυτές που ορίσαμε στις Συνοριακές Συνθήκες, όπως φαίνεται και παρακάτω:

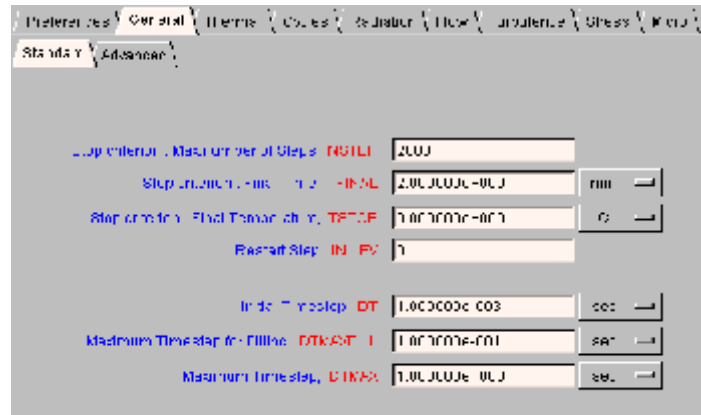
- Θερμοκρασία καλουπιού: 550 °C
- Θερμοκρασία τήγματος: 940 °C



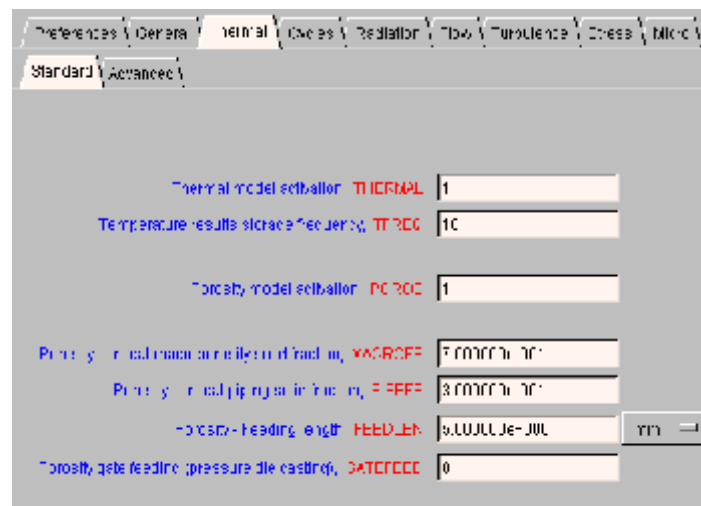
Εικόνα 4. 26 Οι αρχικές συνθήκες για την προσομοίωση της φυγοκεντρικής βαρύτητας.

Ορισμός Παραμέτρων Τρεξίματος:

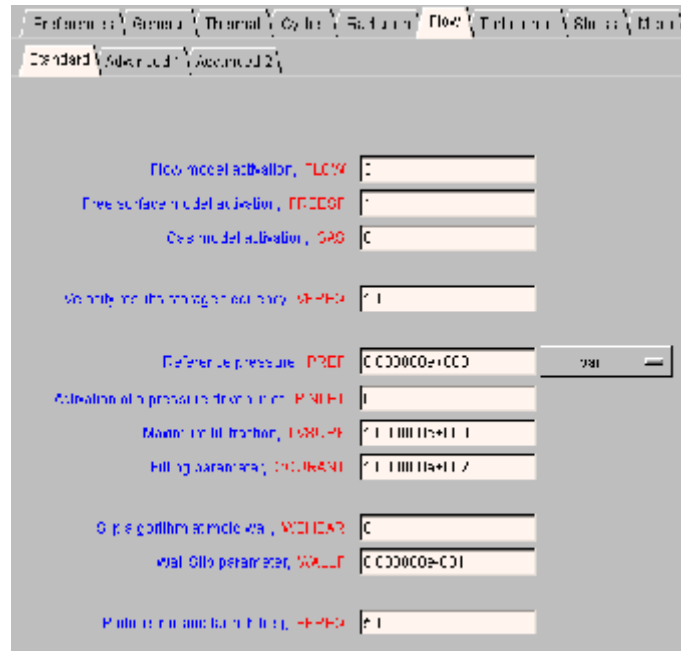
Τέλος είναι απαραίτητος ο καθορισμός των Παραμέτρων τρεξίματος – Run Parameters- που ήταν οι ακόλουθες:



Εικόνα 4. 27 Ορισμός των γενικών παραμέτρων τρεξίματος



Εικόνα 4. 28 Ορισμός των θερμικών παραμέτρων τρεξίματος



Εικόνα 4. 29 Ορισμός των ροϊκών παραμέτρων τρεξίματος.

Από τις παραμέτρους τρεξίματος, για τη φυγοκεντρική χύτευση μπορούμε να ξεχωρίσουμε τις εξής:

LVSURF:

Στην περίπτωση αυτή ορίστηκε ίσο με 1, αφού διαπιστώθηκε η ελλιπής πλήρωση του καλουπιού για τιμή 0,98 ή 0,99.

WSHEAR:

Αποτελεί βασική παράμετρο της φυγοκεντρικής χύτευσης, και πρέπει να οριστεί ίση με 0 για να είναι δυνατή η εκτέλεση της προσομοίωσης,

4.2.3 Εύρεση του Συντελεστή Μετάδοσης Θερμότητας μέσω Direct Modeling.

Διαδικασία εύρεσης του Σ.Μ.Θ:

Όπως έχει αναφερθεί στο πρώτο κεφάλαιο της εργασίας, ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας (Σ.Μ.Θ), εξαρτάται τόσο από τις φυσικές και χημικές ιδιότητες του κράματος και του καλουπιού, όσο και από τη θέση του χυτού. Επιπλέον, δεν έχει σταθερή τιμή, αλλά μεταβάλλεται συναρτήσει του χρόνου σε τρία στάδια. Αρχικά, που η αποβολή θερμότητας από το τήγμα στο καλούπι είναι πολύ μεγάλη, έχουμε υψηλές τιμές, οι οποίες όμως μειώνονται σημαντικά μετά από σύντομο χρονικό διάστημα. Στη συνέχεια, στο δεύτερο στάδιο, η τιμή του σταθεροποιείται και στην τρίτη φάση είτε αυξάνεται, είτε μειώνεται είτε παραμένει σταθερός.

Για τον προσδιορισμό του Σ.Μ.Θ εκτελέστηκαν πειράματα χύτευσης τα οποία λάμβαναν υπόψη, τόσο τη θέση του χυτού απ'όπου παίρναμε μετρήσεις, όσο και την ταχύτητα περιστροφής του καλουπιού, που είχαμε τη δυνατότητα ρύθμισής της. Επιπλέον εξαιτίας της δυσκολίας μέτρησης της αρχικής θερμοκρασίας του τήγματος, είχαμε και διαφορετικό βαθμό υπέρτηξης, στοιχείο που συμπεριλήφθηκε στη διαδικασία των προσομοιώσεων. Έτσι συνυπολογίζοντας όλες τις παραπάνω παραμέτρους, βρήκαμε το Σ.Μ.Θ σε δύο μέρη του χυτού:

- 1) Στη μεγάλη διάμετρο του αντικειμένου (Σημείο Α)
- 2) Στον κεντρικό αγωγό τροφοδοσίας (Σημείο Β)

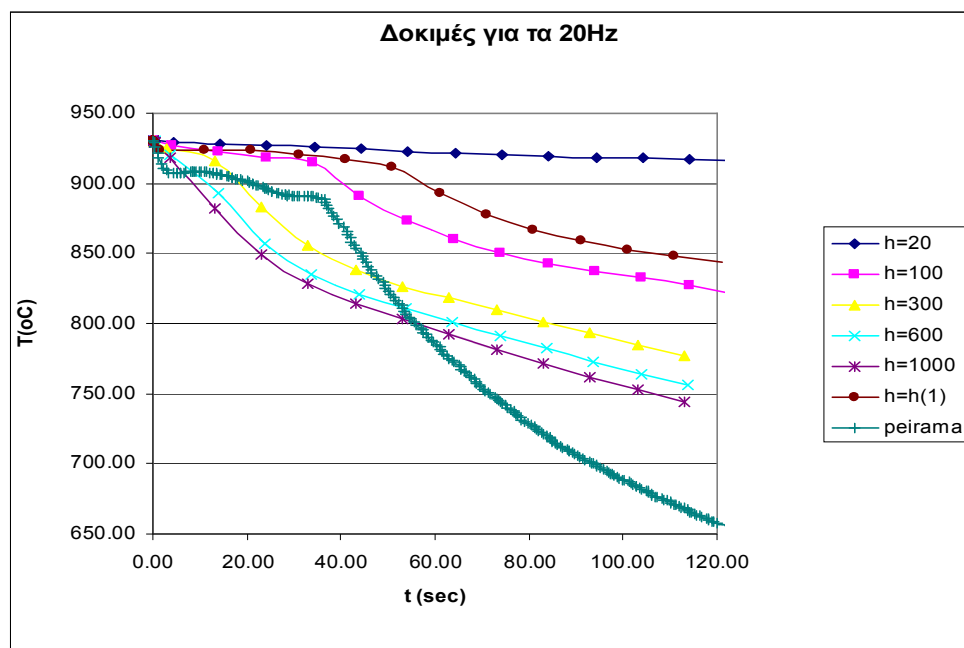
1. Εύρεση του Σ.Μ.Θ στη μεγάλη διάμετρο του χυτού (Σημείο Α):

Οι προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν, είχαν σαν αρχικές συνθήκες (θερμοκρασίες καλουπιού και μετάλλου) τις τιμές που πήραμε από την εκτέλεση των πειραμάτων, με διαφορετική ταχύτητα κάθε φορά. Παρακάτω διακρίνεται ο συγκεντρωτικός πίνακας των αρχικών συνθηκών:

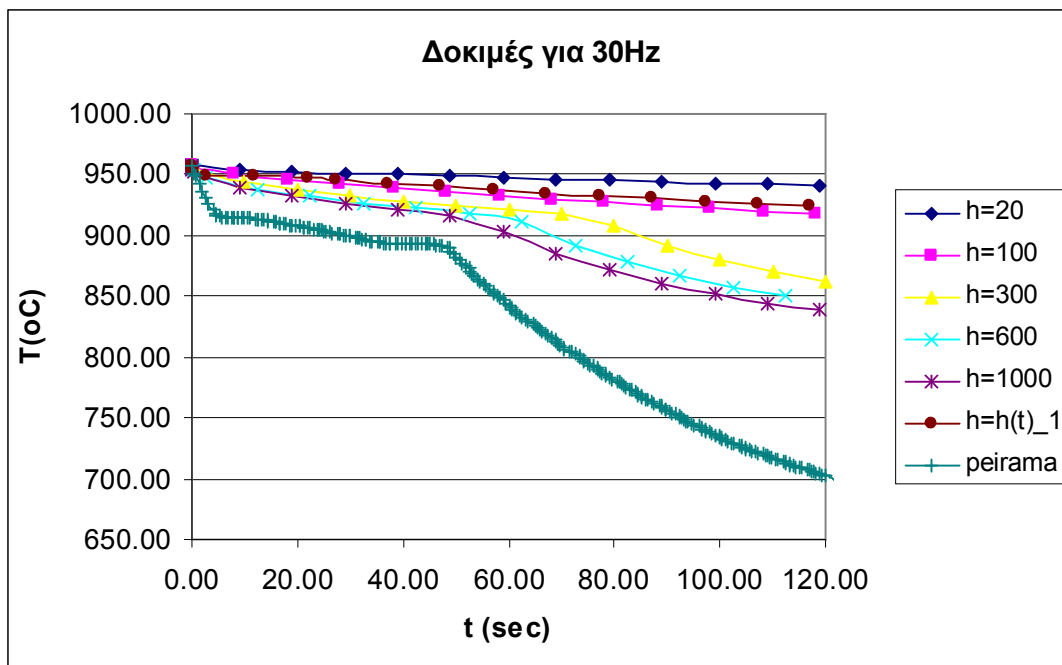
Πίνακας 4. 7 Οι αρχικές συνθήκες προσομοίωσης για κάθε ταχύτητα περιστροφής, κατά την εύρεση του Σ.Μ.Θ στο σημείο Α

Hz	T _{metal} (°C)	T _{mold} (°C)
20	930	530
30	957.93	550.94
40	979.79	548.08
50	930	527.42
60	930	507.17

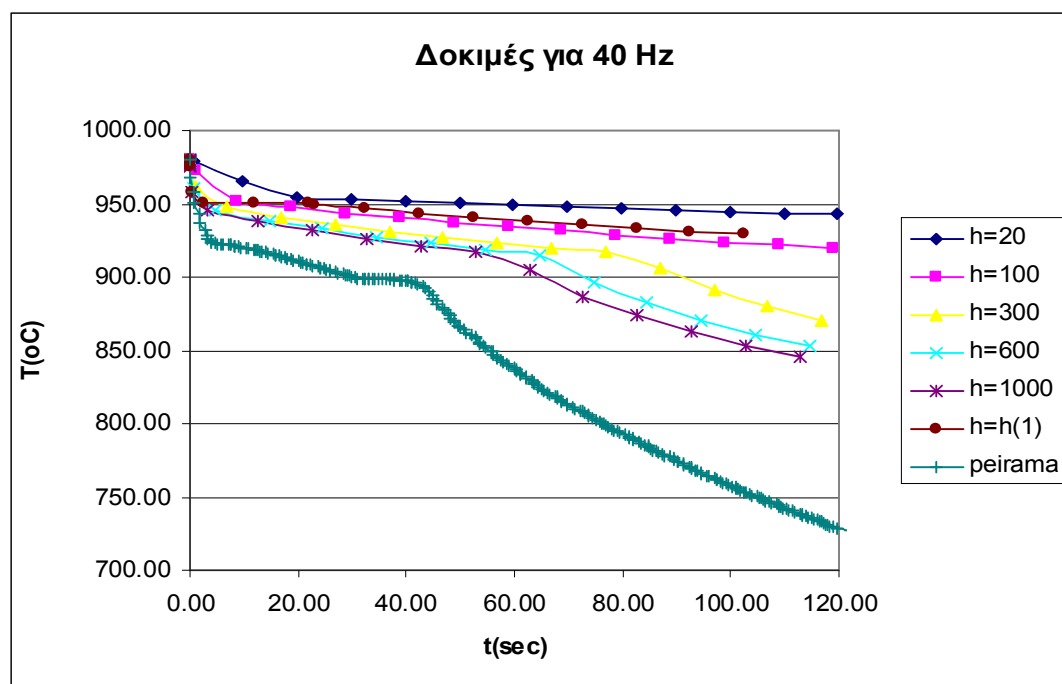
Στη συνέχεια έγινε εύρεση του Σ.Μ.Θ για κάθε ταχύτητα ξεχωριστά. Για να υπάρξει μια αρχική ένδειξη της τιμής του, πραγματοποιήθηκαν αρκετές προσομοιώσεις τόσο με σταθερούς όσο και με μεταβλητούς συντελεστές, τα αποτελέσματα των οποίων διακρίνονται στα διαγράμματα 4.17 έως 4.21.



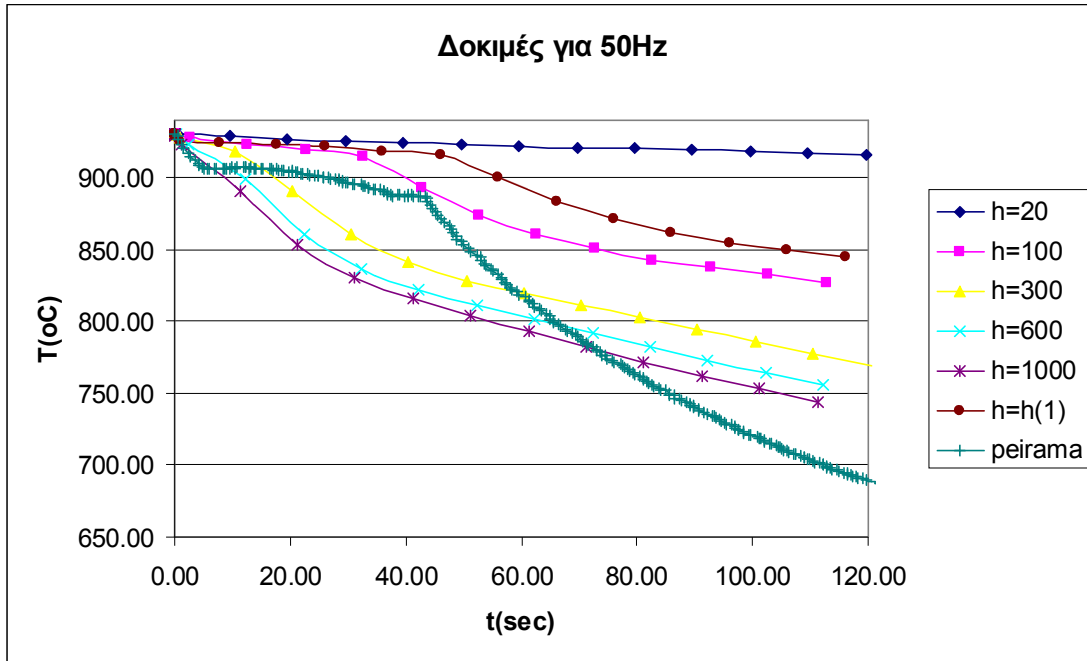
Διάγραμμα 4. 17 Οι δοκιμαστικές προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν για την εύρεση του Σ.Μ.Θ στο σημείο Α, στα 20Hz.



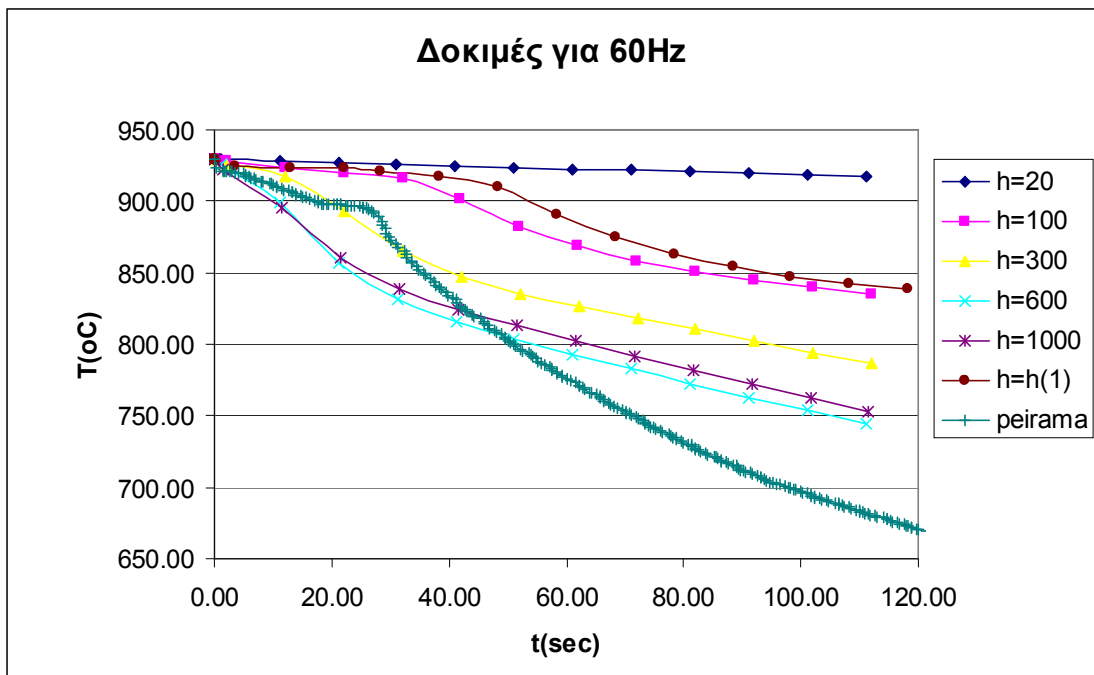
Διάγραμμα 4. 18 Οι δοκιμαστικές προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν για την εύρεση του Σ.Μ.Θ στο σημείο Α, στα 30Hz.



Διάγραμμα 4. 19 Οι δοκιμαστικές προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν για την εύρεση του Σ.Μ.Θ στο σημείο Α, στα 40Hz.



Διάγραμμα 4. 20 Οι δοκιμαστικές προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν για την εύρεση του Σ.Μ.Θ στο σημείο A, στα 50Hz.



Διάγραμμα 4. 21 Οι δοκιμαστικές προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν για την εύρεση του Σ.Μ.Θ στο σημείο A, στα 60Hz.

Ωστόσο, όπως φαίνεται, οι καμπύλες απόψυξης που αντιστοιχούν στους συντελεστές αυτούς, δεν συγκλίνουν ικανοποιητικά με την πειραματική καμπύλη απόψυξης. Για το λόγο αυτό, ακολούθησαν αλληπάλληλες δοκιμές χρησιμοποιώντας

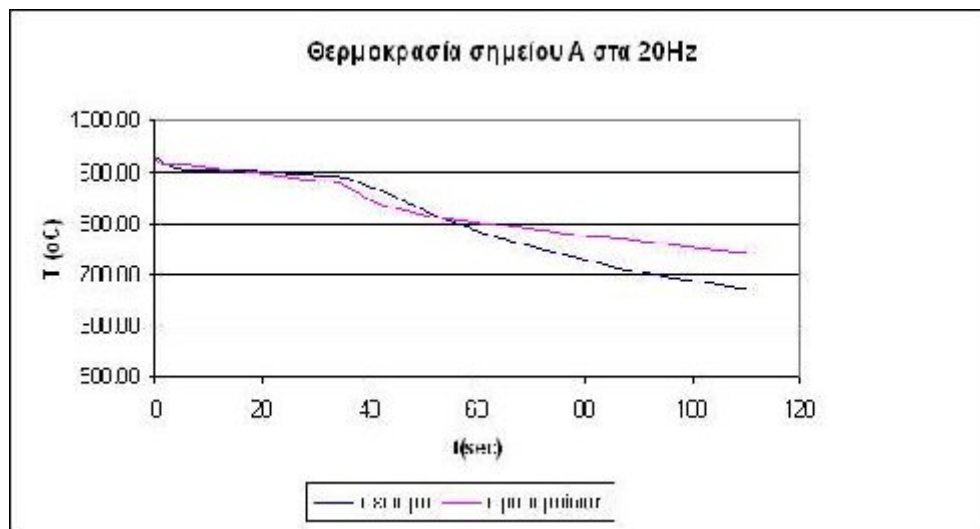
μεταβλητούς συντελεστές, έως ότου επέλθει η καλύτερη δυνατή σύγκλιση των δυο καμπύλων. Να σημειώσουμε ότι σε όλες τις δοκιμές προσομοίωσης όλες οι συνθήκες παρέμεναν σταθερές και μεταβάλλαμε μόνο τον Σ.Μ.Θ. Έτσι, καταλήξαμε στους παρακάτω συντελεστές για κάθε ταχύτητα περιστροφής:

Σημείο Α:

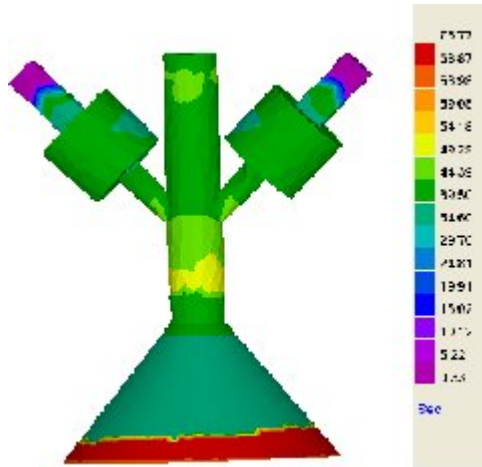
1.20 Hz:

Ο συντελεστής με τον οποίο έγινε η καλύτερη σύγκλιση της πειραματικής και της υπολογιστικής καμπύλης, ήταν ο παρακάτω:

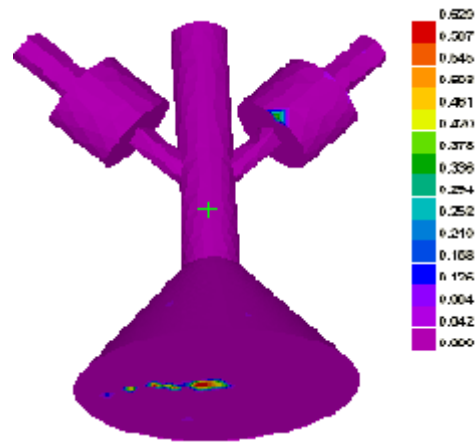
$$h = \begin{cases} 5000 \text{ W/m}^2\text{K}, & 0 < t < 5 \text{ sec} \\ 80 \text{ W/m}^2\text{K}, & 5 < t < 40 \text{ sec} \\ 3000 \text{ W/m}^2\text{K}, & 40 \text{ sec} < t \end{cases}$$



Διάγραμμα 4. 22 Σύγκλιση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων προσομοίωσης με τον Σ.Μ.Θ που υπολογίστηκε στο σημείο Α, με ταχύτητα περιστροφής 20Hz



Εικόνα 4. 30 Ο χρόνος στερεοποίησης



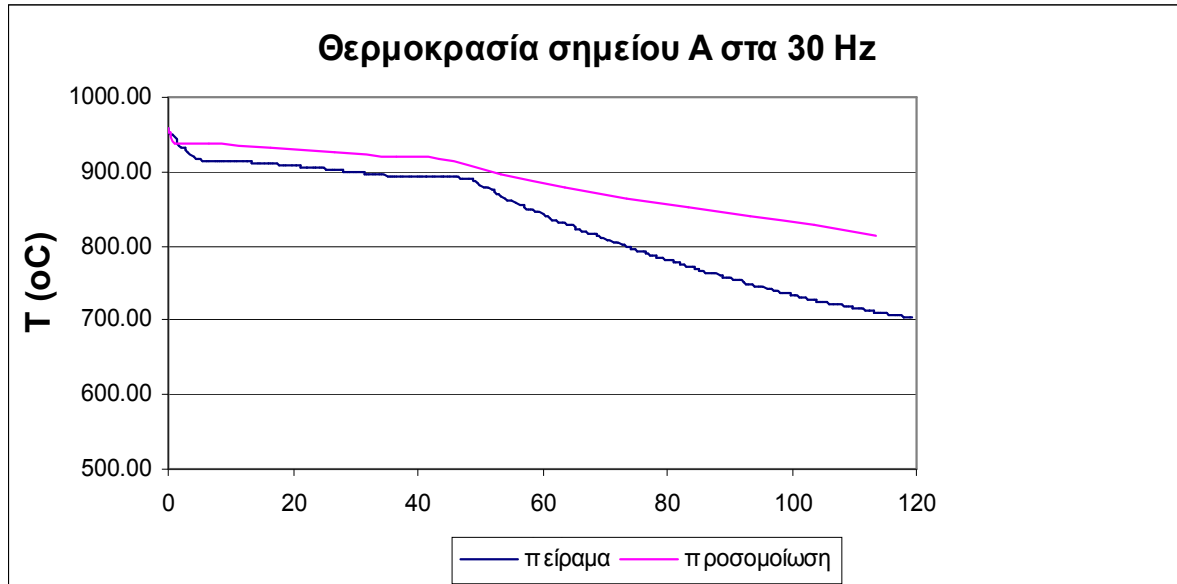
Εικόνα 4. 31 Το πορώδες του χυτού για την ταχύτητα των 20Hz

Πραγματοποιώντας προσομοίωση της φυγοκεντρικής χύτευσης με το συντελεστή που βρήκαμε για τα 20Hz και αρχικές συνθήκες αυτές του πειράματος, προκύπτουν τα αποτελέσματα που εμφανίζονται στις εικόνες 4.30 και 4.31. Ο μέγιστος χρόνος στερεοποίησης είναι 49,29sec και το μέγιστο ποσοστό πορώδους στο χυτό είναι 0,378%

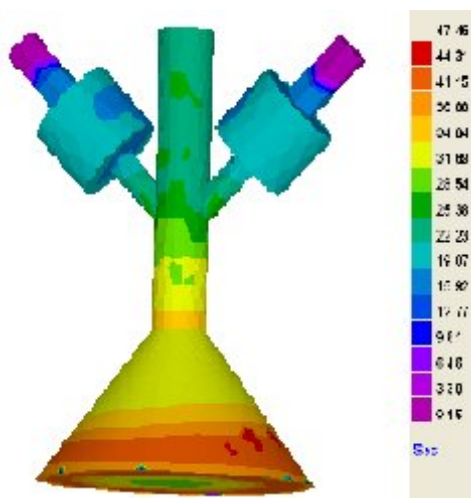
2.30 Hz:

Ο συντελεστής με την πιο ικανοποιητική καμπύλη ταύτισης με την πειραματική, ήταν ο ακόλουθος:

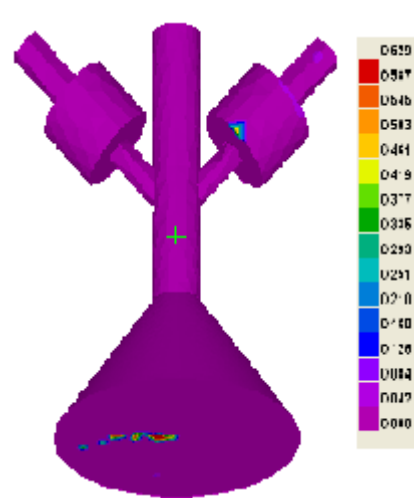
$$h = \begin{cases} 8000 \text{ W / m}^2\text{K}, & 0 < t < 5 \text{ sec} \\ 3000 \text{ W / m}^2\text{K}, & 5 < t < 40 \text{ sec} \\ 6000 \text{ W / m}^2\text{K}, & 40 \text{ sec} < t \end{cases}$$



Διάγραμμα 4. 23 Σύγκλιση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων προσομοίωσης με τον Σ.Μ.Θ που υπολογίστηκε στο σημείο Α, με ταχύτητα περιστροφής 30Hz.



Εικόνα 4. 32 Ο χρόνος στερεοποίησης



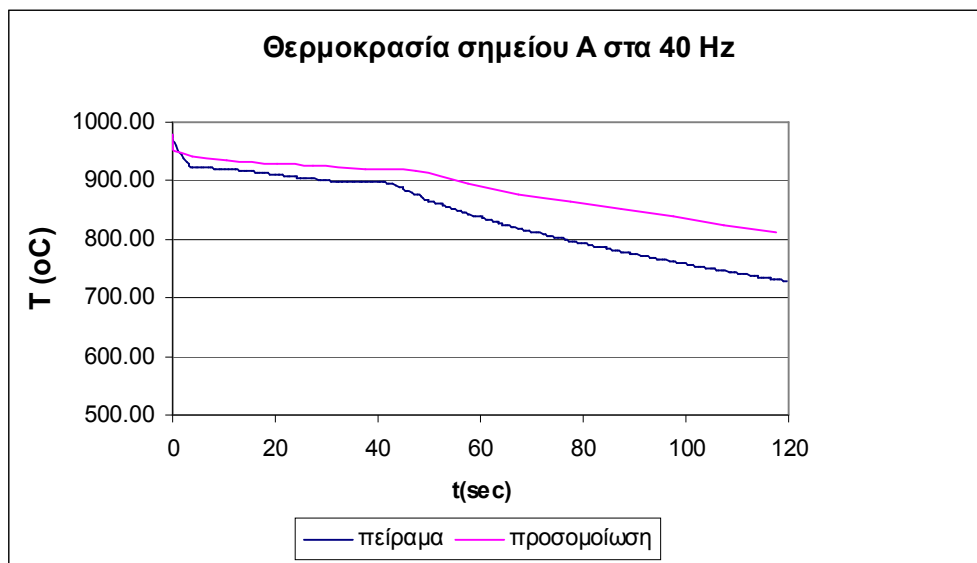
Εικόνα 4. 33 Το πορώδες του χυτού για την ταχύτητα των 30Hz

Πραγματοποιώντας προσομοίωση της φυγοκεντρικής χύτευσης με το συντελεστή που βρήκαμε για τα 30Hz και αρχικές συνθήκες αυτές του πειράματος, προκύπτουν τα αποτελέσματα που εμφανίζονται στις εικόνες 4.32 και 4.33. Ο μέγιστος χρόνος στερεοποίησης είναι 44,30sec και το μέγιστο ποσοστό πορώδους στο χυτό είναι 0,377%

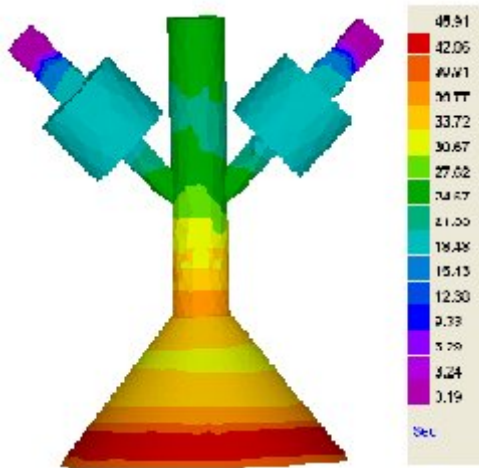
3. 40 Hz:

Ο συντελεστής που απέδωσε, πιο ικανοποιητικά την πειραματική καμπύλη των 40Hz, είναι ο παρακάτω:

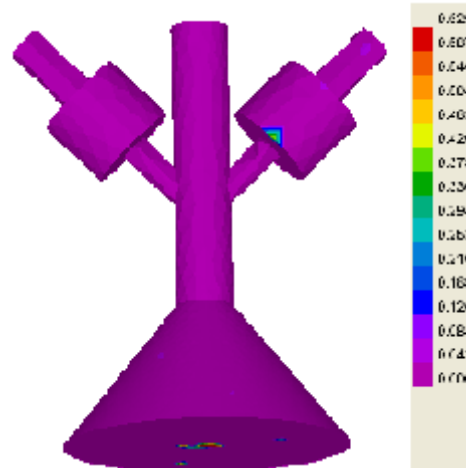
$$h = \begin{cases} 7000 \text{ W / m}^2\text{K}, & 0 < t < 5 \text{ sec} \\ 2000 \text{ W / m}^2\text{K}, & 5 < t < 40 \text{ sec} \\ 7000 \text{ W / m}^2\text{K}, & 40 \text{ sec} < t \end{cases}$$



Διάγραμμα 4. 24 Σύγκλιση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων προσομοίωσης με τον Σ.Μ.Θ που υπολογίστηκε στο σημείο Α, με ταχύτητα περιστροφής 40Hz.



Εικόνα 4. 34 Ο χρόνος στερεοποίησης για τα 40Hz



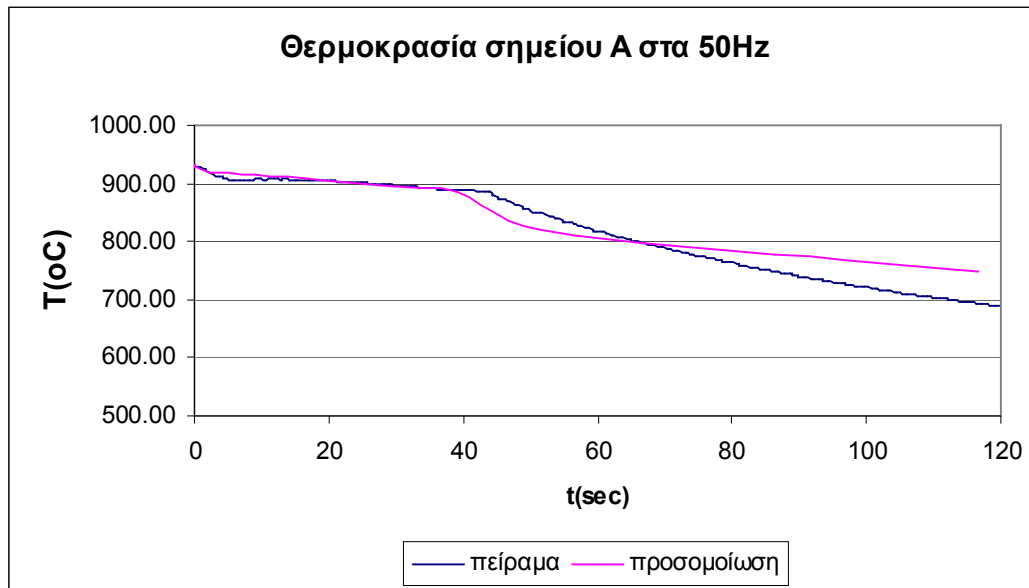
Εικόνα 4. 35 Το πορώδες του χυτού για την ταχύτητα των 40Hz

Πραγματοποιώντας προσομοίωση της φυγοκεντρικής χύτευσης με το συντελεστή που βρήκαμε για τα 40Hz και αρχικές συνθήκες αυτές του πειράματος, προκύπτουν τα αποτελέσματα που εμφανίζονται στις εικόνες 4.34 και 4.35. Ο μέγιστος χρόνος στερεοποίησης είναι 42,96sec και το μέγιστο ποσοστό πορώδους στο χυτό είναι 0,294%

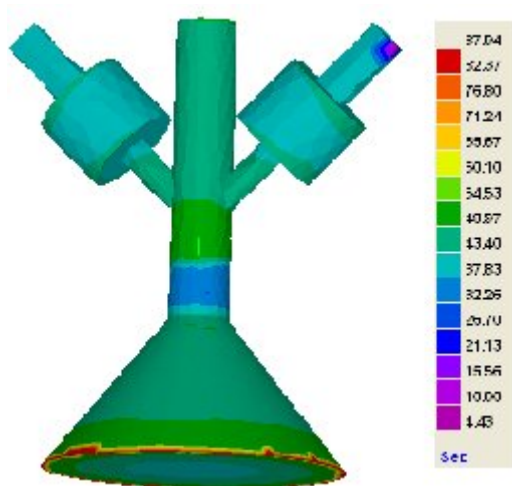
4. 50 Hz:

Ο συντελεστής που προσομοίωσε πιο πιστά την πειραματική διαδικασία, είναι ο ακόλουθος:

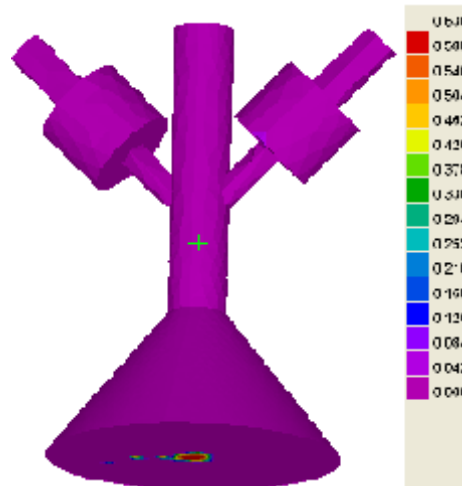
$$h = \begin{cases} 1200 \text{ W / m}^2 \text{ K}, & 0 < t < 5 \text{ sec} \\ 50 \text{ W / m}^2 \text{ K}, & 5 < t < 40 \text{ sec} \\ 1500 \text{ W / m}^2 \text{ K}, & 40 \text{ sec} < t \end{cases}$$



Διάγραμμα 4. 25 Σύγκλιση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων προσομοίωσης με τον Σ.Μ.Θ που υπολογίστηκε στο σημείο Α, με ταχύτητα περιστροφής 50Hz.



Εικόνα 4. 36 Ο χρόνος στερεοποίησης



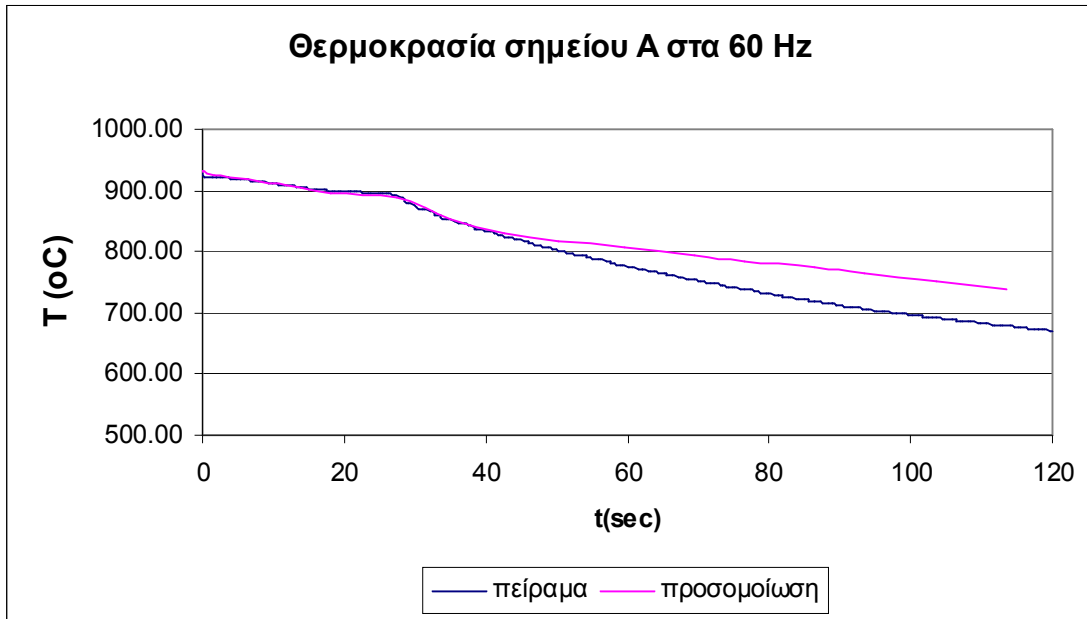
Εικόνα 4. 37 Το πορώδες του χυτού για την ταχύτητα των 50Hz

Πραγματοποιώντας προσομοίωση της φυγοκεντρικής χύτευσης με το συντελεστή που βρήκαμε για τα 50Hz και αρχικές συνθήκες αυτές του πειράματος, προκύπτουν τα αποτελέσματα που εμφανίζονται στις εικόνες 4.36 και 4.37. Ο μέγιστος χρόνος στερεοποίησης είναι 43,40sec και το μέγιστο ποσοστό πορώδους στο χυτό είναι 0,084%

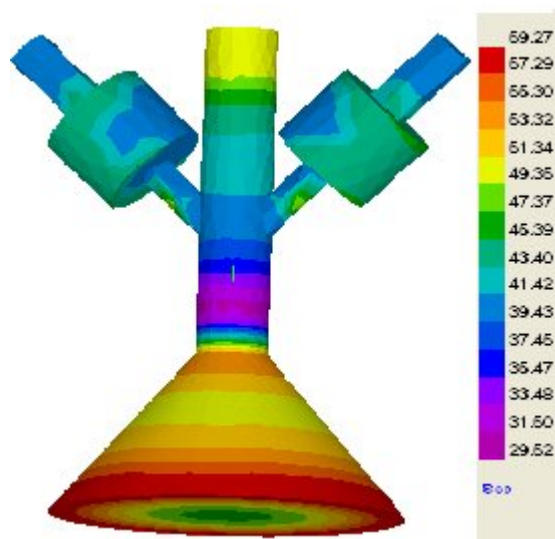
5.60 Hz:

Η σύγκλιση ανάμεσα στην καμπύλη προσομοίωσης και του πειράματος, επήλθε με τον εξής μεταβλητό συντελεστή:

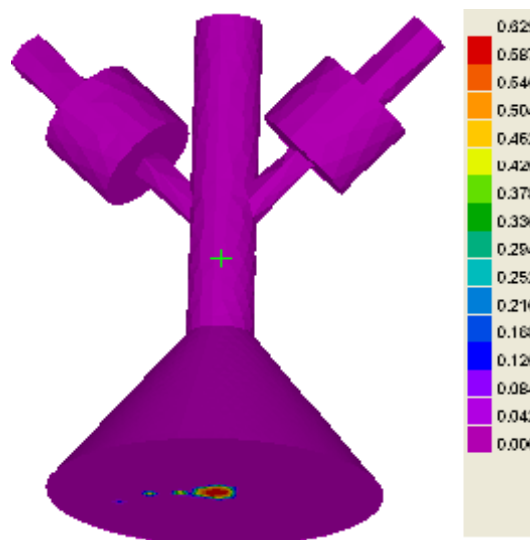
$$h = \begin{cases} 600 \text{ W/m}^2\text{K}, & 0 < t < 5 \text{ sec} \\ 50 \text{ W/m}^2\text{K}, & 5 < t < 40 \text{ sec} \\ 1000 \text{ W/m}^2\text{K}, & 40 \text{ sec} < t \end{cases}$$



Διάγραμμα 4. 26 Σύγκλιση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων προσομοίωσης με τον Σ.Μ.Θ που υπολογίστηκε στο σημείο Α, με ταχύτητα περιστροφής 60Hz.



Εικόνα 4. 38 Ο χρόνος στερεοποίησης



Εικόνα 4. 39 Το πορώδες του χυτού για την ταχύτητα των 60Hz

Πραγματοποιώντας προσομοίωση της φυγοκεντρικής χύτευσης με το συντελεστή που βρήκαμε για τα 60Hz και αρχικές συνθήκες αυτές του πειράματος, προκύπτουν τα αποτελέσματα που εμφανίζονται στις εικόνες 4.38 και 4.39. Ο μέγιστος χρόνος στερεοποίησης είναι 43,40sec και το μέγιστο ποσοστό πορώδους στο χυτό είναι 0,042%

ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΟΥ Σ.Μ.Θ:

Πίνακας 4. 8 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τον Σ.Μ.Θ στο σημείο Α, για όλες τις ταχύτητες περιστροφής, στα τρία χρονικά στάδια μεταβολής του

Hz \ t	0-5 sec	5-40 sec	40-120 sec
20	5000	80	3000
30	8000	3000	6000
40	7000	2000	7000
50	1200	50	1500
60	600	50	1000

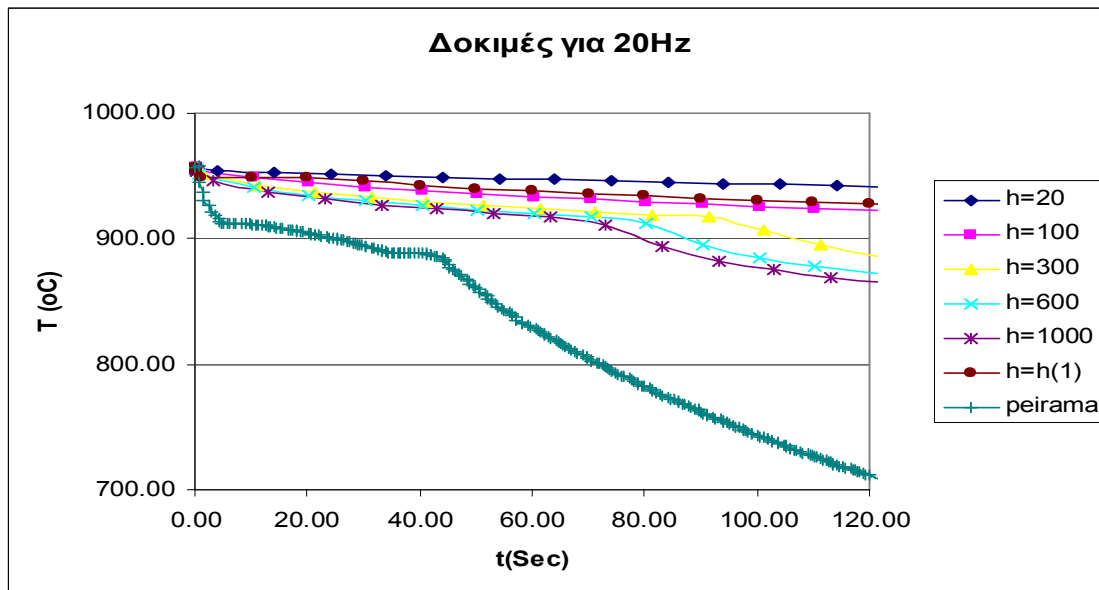
2. Εύρεση του Σ.Μ.Θ στον κεντρικό αγωγό τροφοδοσίας(Σημείο Β):

Και σε αυτήν την περίπτωση ακολουθήσαμε την ίδια διαδικασία εύρεσης του Σ.Μ.Θ. με αρχικές συνθήκες αυτές που λάβαμε από την εκτέλεση των πειραμάτων και περιγράφονται στον Πίνακα 4.9 :

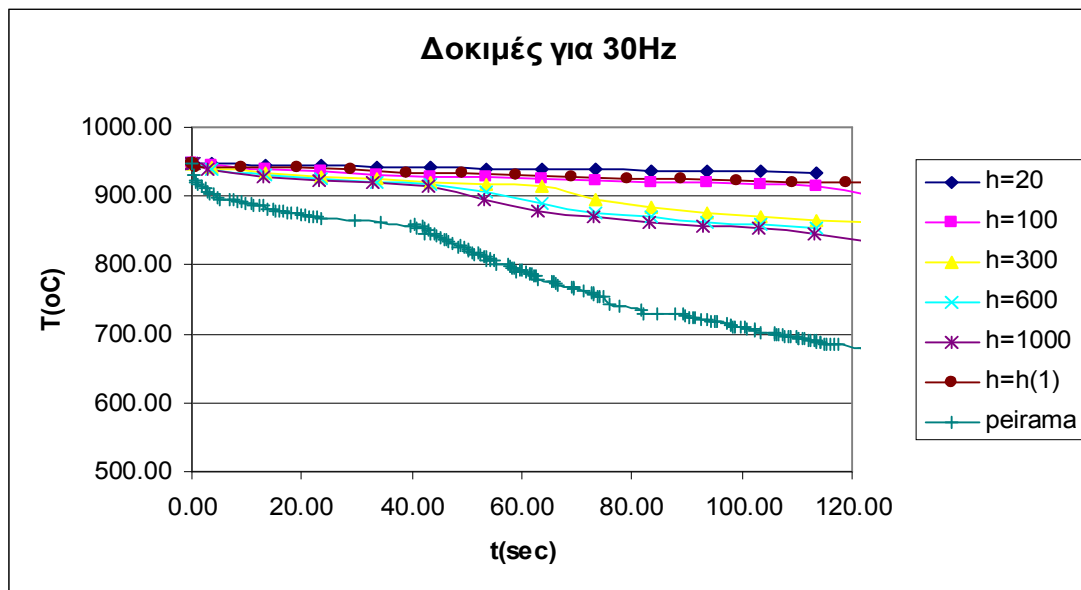
Πίνακας 4. 9 Οι αρχικές συνθήκες προσομοίωσης για κάθε ταχύτητα περιστροφής, κατά την εύρεση του Σ.Μ.Θ στο σημείο Β

Hz	T _{metal} (°C)	T _{mold} (°C)
20	957.34	560.01
30	947.08	545.74
40	973.12	585.03
50	998.88	587.17
60	950.77	546.61

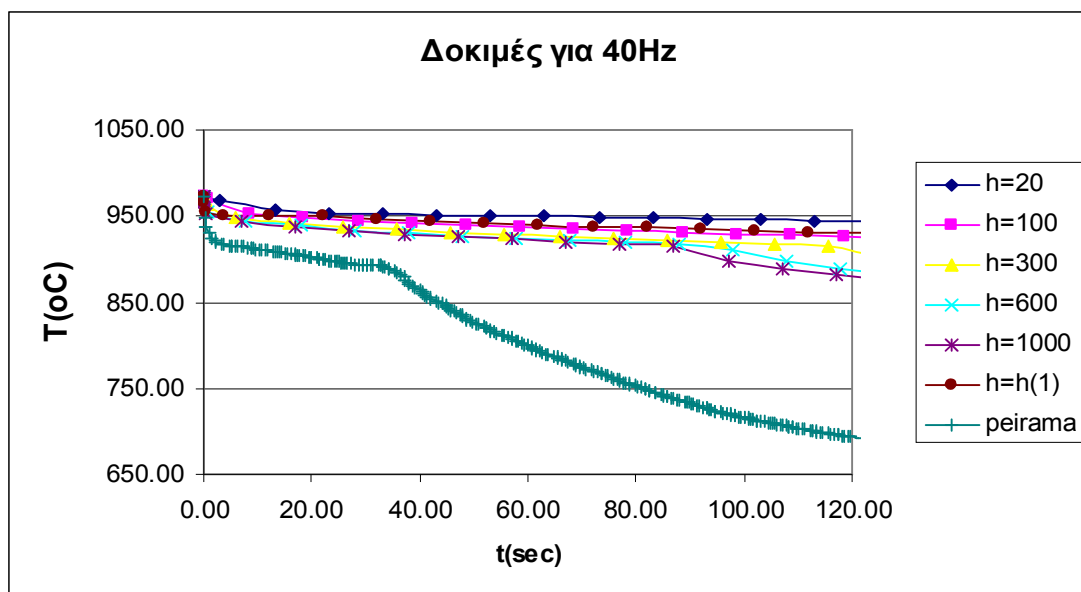
Για να έχουμε μια εκτίμηση της τιμής του Σ.Μ.Θ έγιναν και εδώ προσομοιώσεις με σταθερούς και μεταβλητούς συντελεστές, όμοιους με αυτούς του τεμαχίου. Παρόλα αυτά δεν έδωσαν ικανοποιητικά αποτελέσματα.



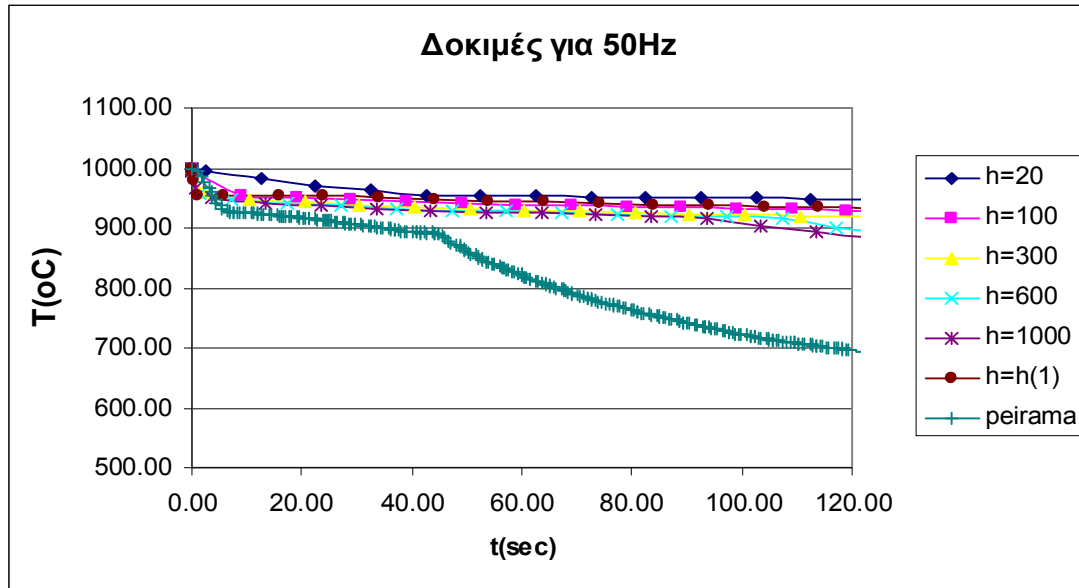
Διάγραμμα 4. 27 Οι δοκιμαστικές προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν για την εύρεση του Σ.Μ.Θ στο σημείο Β, στα 20Hz.



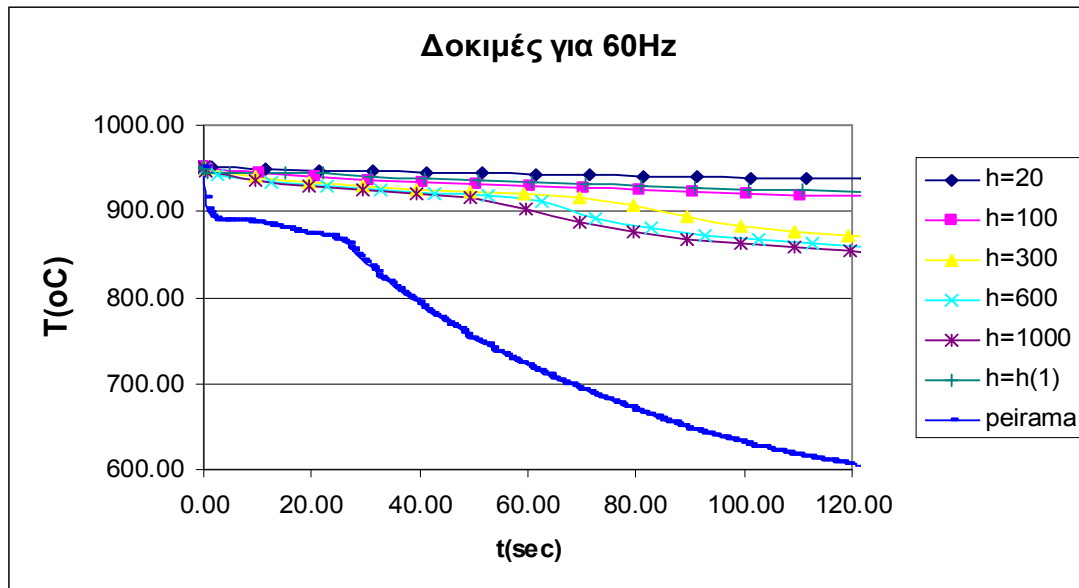
Διάγραμμα 4. 28 Οι δοκιμαστικές προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν για την εύρεση του Σ.Μ.Θ στο σημείο B, στα 30Hz.



Διάγραμμα 4. 29 Οι δοκιμαστικές προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν για την εύρεση του Σ.Μ.Θ στο σημείο B, στα 40Hz.



Διάγραμμα 4. 30 Οι δοκιμαστικές προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν για την εύρεση του Σ.Μ.Θ στο σημείο B, στα 50Hz.



Διάγραμμα 4. 31 Οι δοκιμαστικές προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν για την εύρεση του Σ.Μ.Θ στο σημείο B, στα 60Hz.

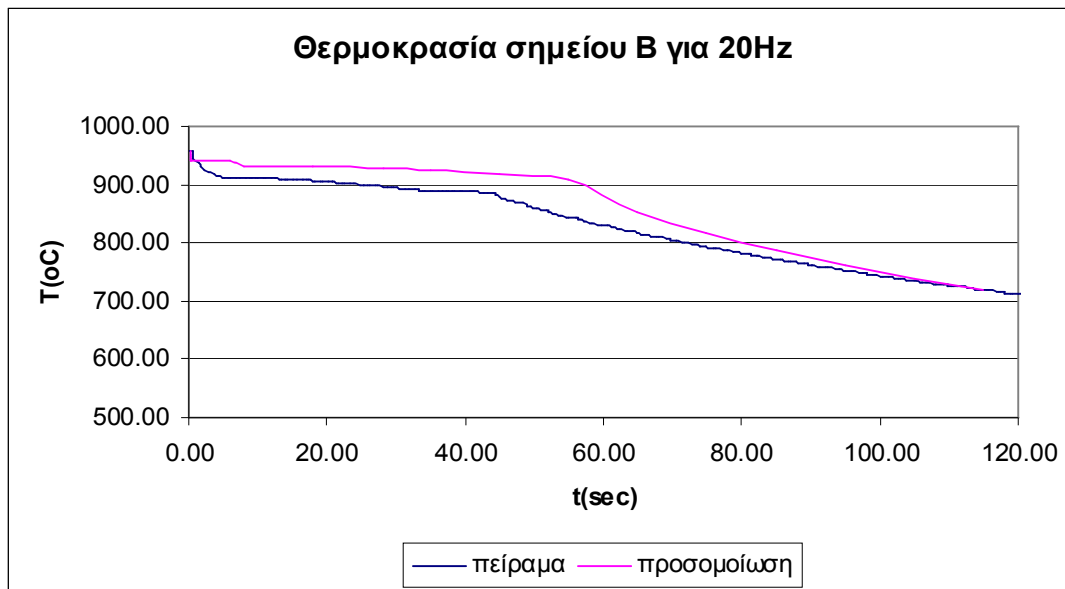
Παρατηρώντας τα παραπάνω διαγράμματα, συμπεραίνουμε ότι ήταν αναγκαία και σε αυτή την περίπτωση η διαδικασία Δοκιμής-Λάθους (trial- error), μέχρι να βρεθεί ο συντελεστής που ικανοποιεί την κάθε πειραματική καμπύλη απόψυξης. Έπειτα από αλληπάλληλες δοκιμές, καταλήξαμε στους ακόλουθους:

Σημείο B:

1. 20 Hz:

Έπειτα από σειρά προσομοιώσεων, καταλήξαμε στον πιο κάτω μεταβλητό συντελεστή προσομοίωσης του πειράματος:

$$h = \begin{cases} 30000 \text{ W / m}^2 \text{ K}, & 0 < t < 6 \text{ sec} \\ 10000 \text{ W / m}^2 \text{ K}, & 6 < t < 20 \text{ sec} \\ 20000 \text{ W / m}^2 \text{ K}, & 20 \text{ sec} < t \end{cases}$$

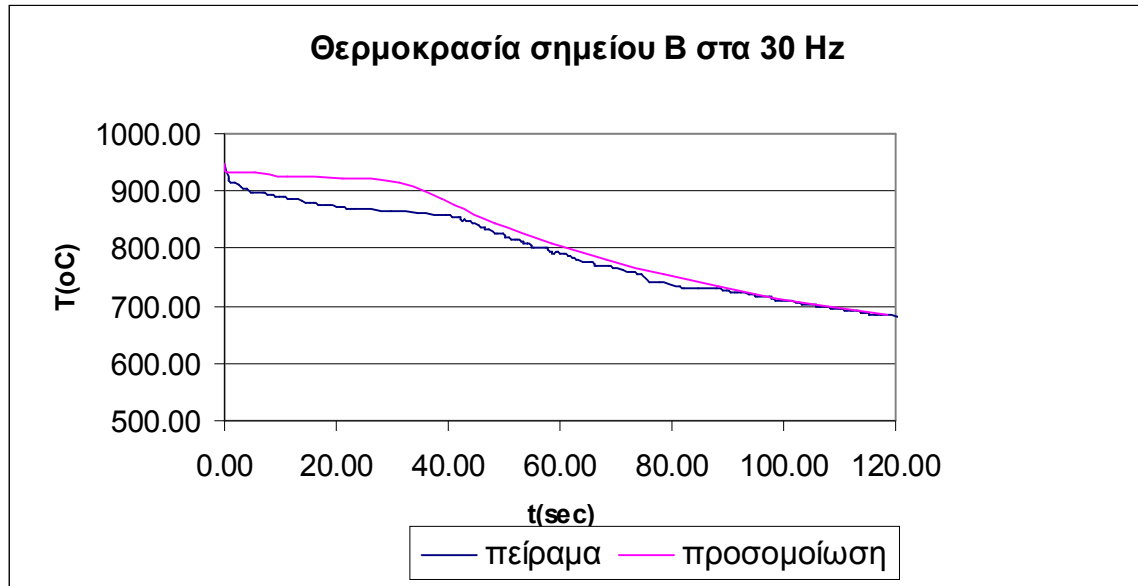


Διάγραμμα 4. 32 Σύγκλιση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων προσομοίωσης με τον Σ.Μ.Θ που υπολογίστηκε στο σημείο B, με ταχύτητα περιστροφής 20Hz.

2. 30 Hz

Η σύγκλιση των δυο καμπυλών πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του συντελεστή:

$$h = \begin{cases} 30000 \text{ W / m}^2 \text{ K}, & 0 < t < 9 \text{ sec} \\ 10000 \text{ W / m}^2 \text{ K}, & 9 < t < 42 \text{ sec} \\ 16000 \text{ W / m}^2 \text{ K}, & 42 \text{ sec} < t \end{cases}$$

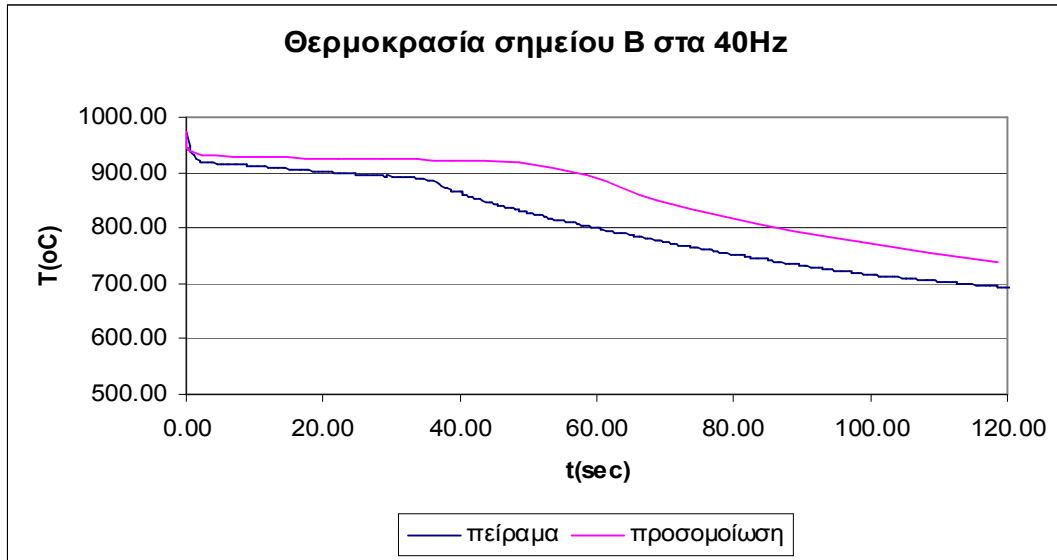


Διάγραμμα 4. 33 Σύγκλιση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων προσομοίωσης με τον Σ.Μ.Θ που υπολογίστηκε στο σημείο Β, με ταχύτητα περιστροφής 30Hz.

3. 40 Hz:

Μετά από πολλές διαδικασίες προσομοίωσης, ο συντελεστής που απέδωσε ικανοποιητικότερα την πειραματική καμπύλη ήταν ο εξής:

$$h = \begin{cases} 30000 \text{ W / m}^2 \text{ K}, & 0 < t < 5 \text{ sec} \\ 15000 \text{ W / m}^2 \text{ K}, & 5 < t < 40 \text{ sec} \\ 16000 \text{ W / m}^2 \text{ K}, & 40 \text{ sec} < t \end{cases}$$

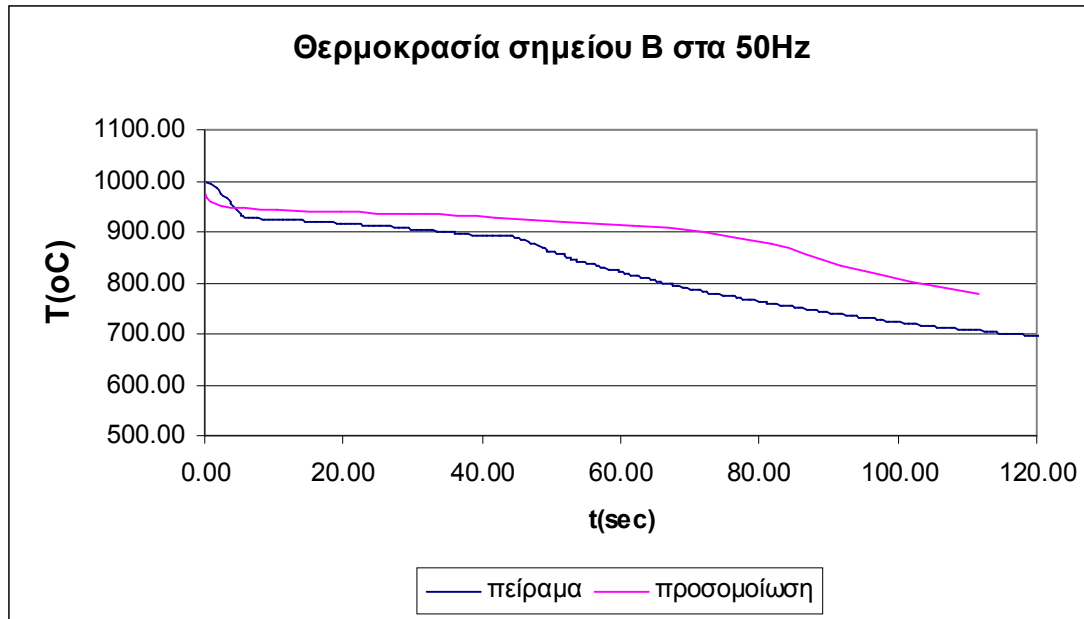


Διάγραμμα 4. 34 Σύγκλιση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων προσομοίωσης με τον Σ.Μ.Θ που υπολογίστηκε στο σημείο Β, με ταχύτητα περιστροφής 40Hz.

4. 50 Hz:

Ο Σ.Μ.Θ που αναπαριστά την πειραματική διαδικασία για τα 50 Hz είναι ο παρακάτω:

$$h = \begin{cases} 1800 \text{ W/m}^2\text{K}, & 0 < t < 10\text{sec} \\ 500 \text{ W/m}^2\text{K}, & 10 < t < 20\text{sec} \\ 30000 \text{ W/m}^2\text{K}, & 20\text{sec} < t \end{cases}$$

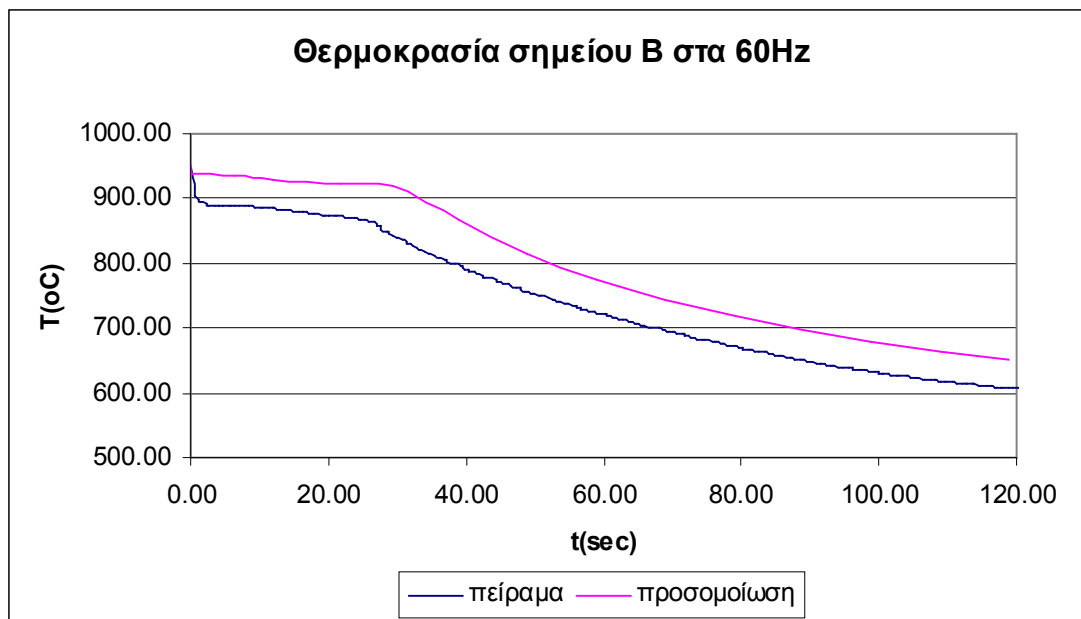


Διάγραμμα 4. 35 Σύγκλιση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων προσομοίωσης με τον Σ.Μ.Θ που υπολογίστηκε στο σημείο B, με ταχύτητα περιστροφής 50Hz.

5. 60 Hz:

Η μορφή του συντελεστή που δίνει καλύτερα αποτελέσματα σύγκλισης, πειραματικών μετρήσεων και αποτελεσμάτων προσομοίωσης είναι:

$$h = \begin{cases} 40000 \text{ W / m}^2\text{K}, & 0 < t < 2\text{sec} \\ 20000 \text{ W / m}^2\text{K}, & 2 < t < 10\text{sec} \\ 30000 \text{ W / m}^2\text{K}, & 10\text{sec} < t \end{cases}$$



Διάγραμμα 4. 36 Σύγκλιση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων προσομοίωσης με τον Σ.Μ.Θ που υπολογίστηκε στο σημείο B, με ταχύτητα περιστροφής 60Hz.

ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ

Πίνακας 4. 10 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τον Σ.Μ.Θ στο Σημείο B, για όλες τις ταχύτητες περιστροφής, στα τρία χρονικά στάδια μεταβολής του

Hz \ t	0-5 sec	5-40 sec	40-120sec
20	30000	16000	20000
30	30000	13000	16000
40	30000	15000	16000
50	18000	28000	30000
60	28000	28000	30000

5.3.3. Μελέτη επίδρασης των παραμέτρων της Φυγοκεντρικής Χύτευσης στην ποιότητα του χυτού.

Επίδραση των παραμέτρων της μηχανής χύτευσης:

Στην παράγραφο αυτή θα γίνει μελέτη της επίδρασης που έχουν οι βασικοί παράμετροι της χύτευσης, στη διαδικασία της στερεοποίησης, του πορώδους καθώς και στην καμπύλη απόψυξης στο τεμάχιο που χυτεύσαμε. Οι παράμετροι που θα εξεταστούν είναι:

1. Η αρχική θερμοκρασία τήγματος (T_{metal})
2. Η αρχική θερμοκρασία του τύπου (T_{mold})
3. Η επιτάχυνση της μηχανής (Ramp-up time)

Η μελέτη έγινε για τα 20Hz, 50Hz και 60Hz, στο σημείο Α, αφού το τεμάχιο είναι αυτό για το οποίο μας ενδιαφέρουν οι ιδιότητές του. Θεωρώντας τιμές αναφοράς, αυτές που προέκυψαν από την προσομοίωση με αρχικές συνθήκες:

- Σ.Μ.Θ : αυτούς που βρέθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο
- Θερμοκρασία τήγματος: $T_{metal} = 940^{\circ}\text{C}$
- Θερμοκρασία τύπου: $T_{mold} = 550^{\circ}\text{C}$
- Ramp-up time: 0 sec.

Για την ταχύτητα των 20Hz:

1. Η επίδραση του T_{metal} (θερμοκρασία τήγματος):

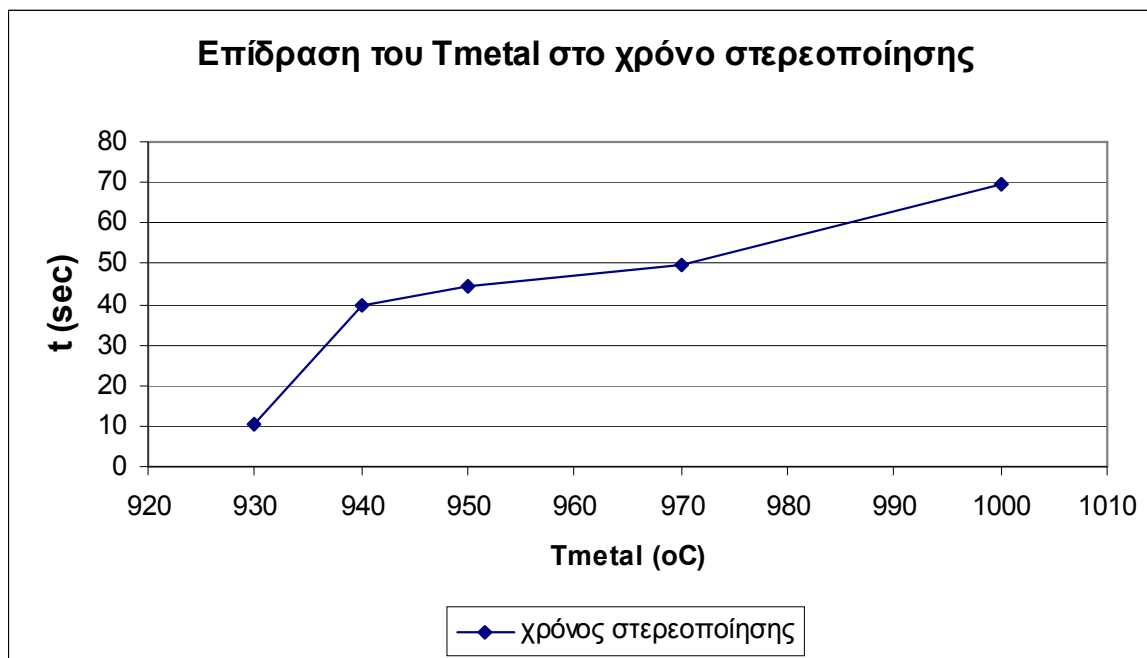
Μεταβάλλοντας μόνο την αρχική θερμοκρασία τήγματος και διατηρώντας όλα τα υπόλοιπα μεγέθη σταθερά, είχαμε τις εξής μεταβολές:

ι) Στο χρόνο στερεοποίησης:

Πίνακας 4. 11 Η μεταβολή του χρόνου στερεοποίησης συναρτήσει της αρχικής θερμοκρασίας τήγματος, για την ταχύτητα των 20Hz.

T_{metal} ($^{\circ}\text{C}$)	Solidification Time (sec)
930	10.68
940	39.5
950	44.39

970	49.91
1000	69.79



Διάγραμμα 4. 37 Η επίδραση της αρχικής θερμοκρασίας τήγματος, στη στερεοποίηση του χυτού, στα 20Hz.

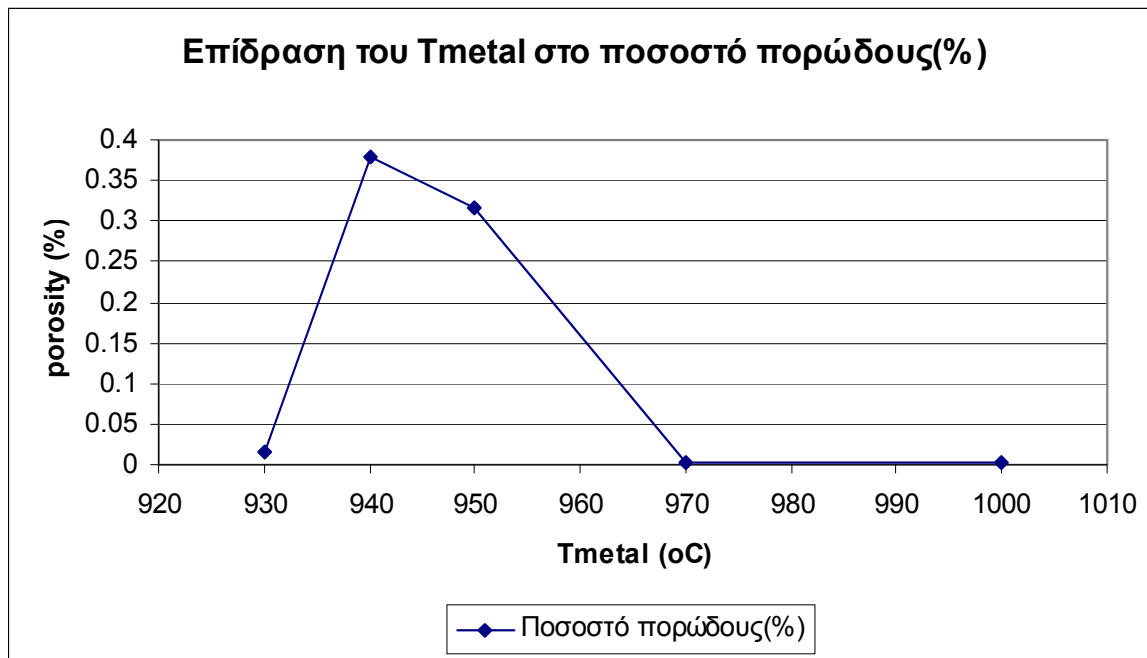
Από τα παραπάνω, είναι φανερό η μεγάλη επίδραση της αρχικής θερμοκρασία του τήγματος, στον απαιτούμενο χρόνο στερεοποίησης, λόγω του υψηλότερου απαιτούμενου χρόνου απόψυξης του χυτού.

ii) Στο ποσοστό πορώδους:

Πίνακας 4. 12 Η μεταβολή του πορώδους, συναρτήσει της αρχικής θερμοκρασίας τήγματος, για την ταχύτητα των 20Hz.

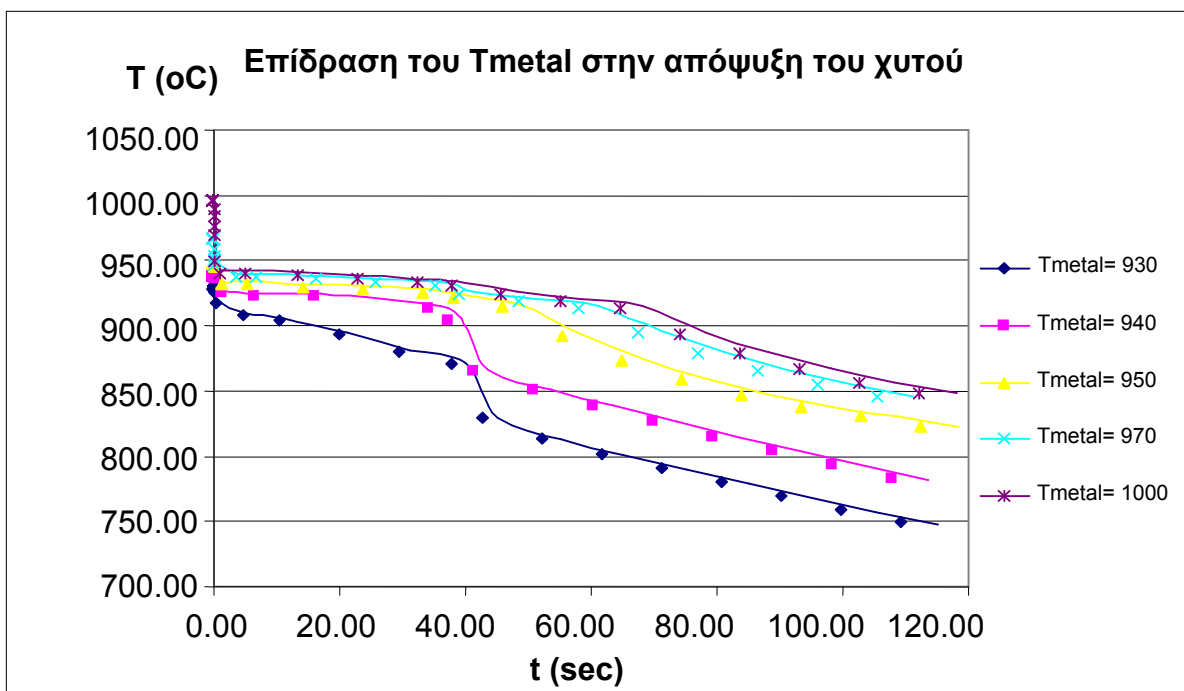
Tmetal (°C)	Porosity (%)	Δporosity (%)
930	0.016	
940	0.378	2262.5
950	0.3166	1878.75
970	0.00242	-84.87
1000	0.0024	-85

Από τον παραπάνω πίνακα παρατηρείται αύξηση του ποσοστού πορώδους για αρχική θερμοκρασία τήγματος 930 °C και 940 °C, ενώ μειώνεται σημαντικά για θερμοκρασίες 970 °C και 1000 °C. Η μεταβολή του πορώδους εμφανίζεται και στο ακόλουθο διάγραμμα.



Διάγραμμα 4. 38 Η επίδραση της αρχικής θερμοκρασίας τήγματος, στο πορώδες του χυτού, στα 20Hz.

iii) Στην καμπύλη απόψυξης του χυτού:



Διάγραμμα 4. 39 Η επίδραση της αρχικής θερμοκρασίας τήγματος, στην απόψυξη του χυτού, στα 20Hz.

Όπως είναι φανερό από το παραπάνω διάγραμμα, η αύξηση της αρχικής θερμοκρασίας τήγματος επηρεάζει την απόψυξη καθ'όλη τη διάρκειά της.

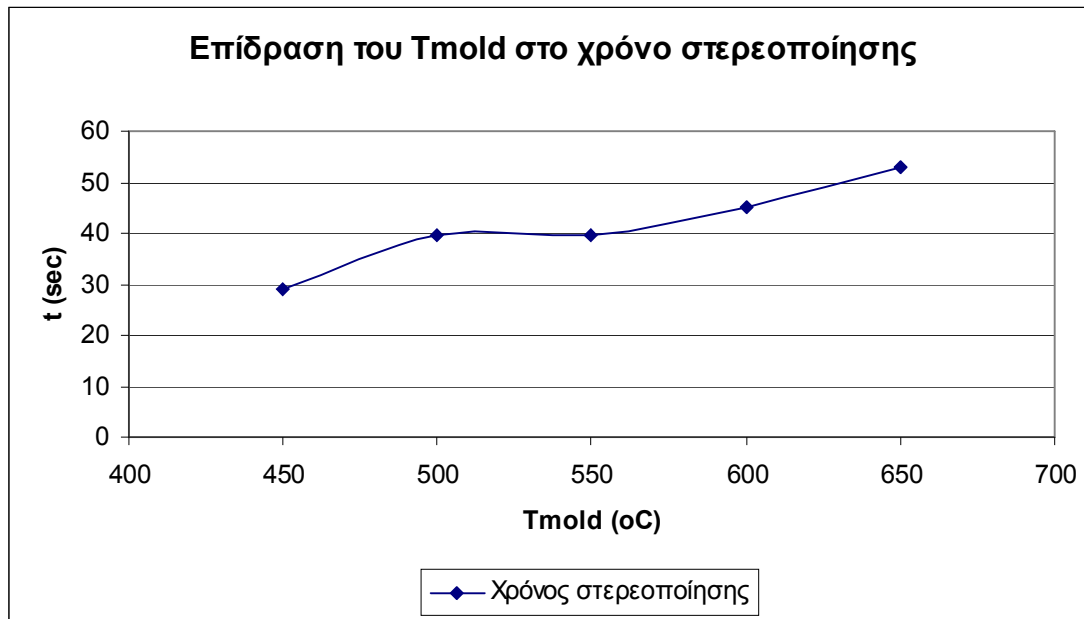
2. Η επίδραση του T_{mold} (θερμοκρασία τύπου):

Κάνοντας προσομοιώσεις για διαφορετικές αρχικές θερμοκρασίες του τύπου και κρατώντας αμετάβλητα τα υπόλοιπα μεγέθη, παρατηρήσαμε τις εξής αλλαγές:

ι) Στο χρόνο στερεοποίησης:

Πίνακας 4. 13 Η μεταβολή του χρόνου στερεοποίησης συναρτήσει της αρχικής θερμοκρασίας καλουπιού, για την ταχύτητα των 20Hz.

T_{mold} (°C)	Solidification Time (sec)
450	28.87
500	39.61
550	39.5
600	45.04
650	52.99



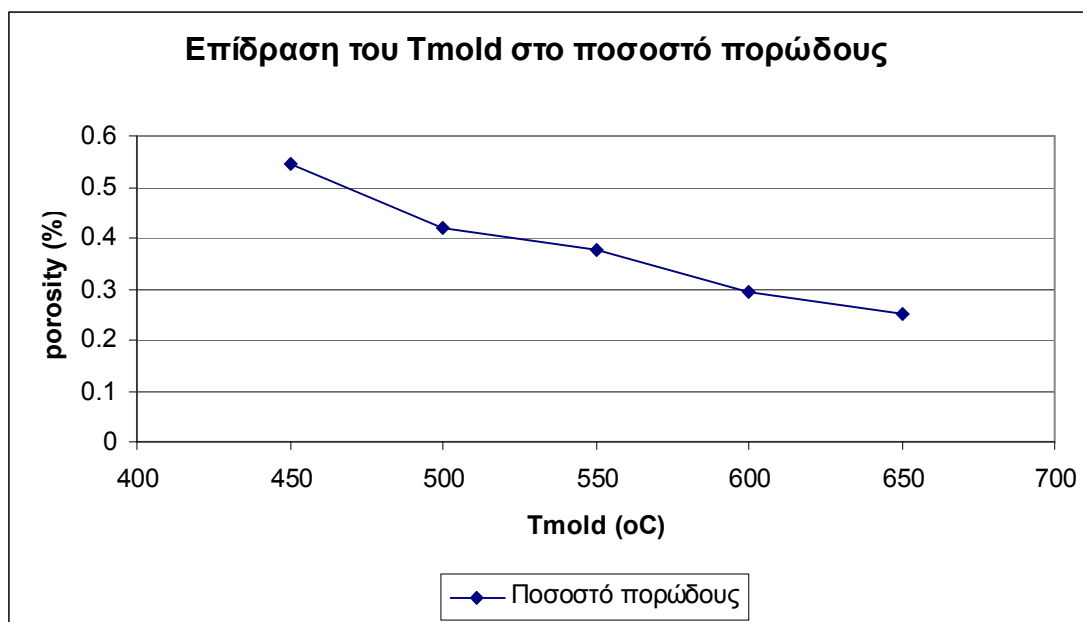
Διάγραμμα 4. 40 Η επίδραση της αρχικής θερμοκρασίας καλουπιού, στο χρόνο στερεοποίησης του χυτού, στα 20Hz.

Παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η αρχική θερμοκρασία του καλουπιού αυξάνεται και ο χρόνος στερεοποίησης. Αυτό είναι αναμενόμενο αφού μειώνεται η θερμοχωρητικότητα του καλουπιού και κατ'έπекταση ο ρυθμός εναλλαγής θερμότητας με το περιβάλλον.

ii) Στο ποσοστό πορώδους:

Πίνακας 4. 14 Η μεταβολή του πορώδους, συναρτήσει της αρχικής θερμοκρασίας καλουπιού, για την ταχύτητα των 20Hz.

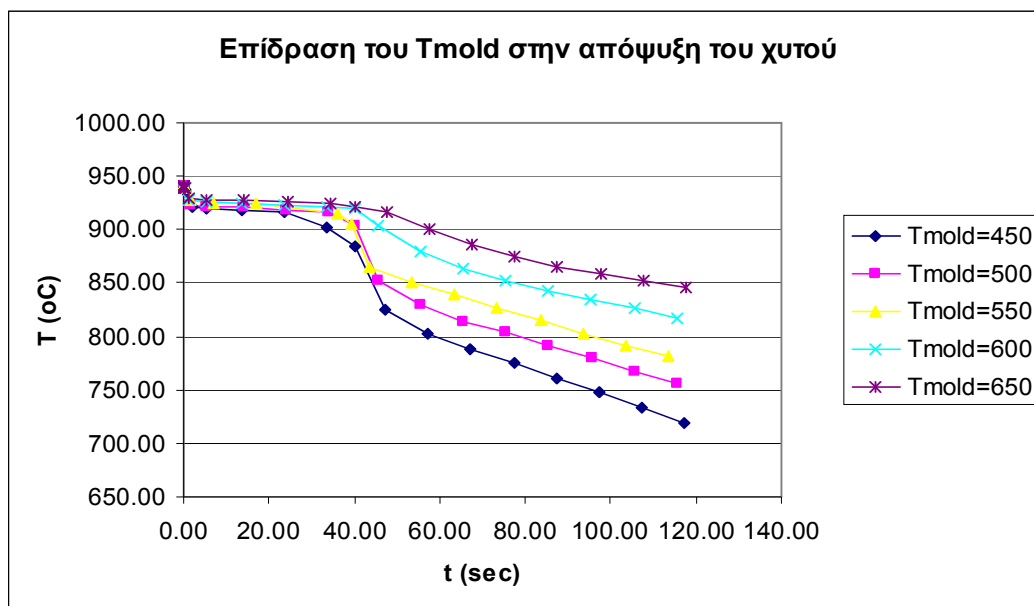
Tmold(°C)	Porosity (%)	Δporosity (%)
450	0.545	
500	0.420	-22.93
550	0.378	-30.64
600	0.294	-46.05
650	0.251	-53.94



Διάγραμμα 4. 41 Η επίδραση της αρχικής θερμοκρασίας καλουπιού, στο πορώδες του χυτού, στα 20Hz

Η μείωση του ποσοστού πορώδους που εμφανίζεται με την αύξηση της αρχικής θερμοκρασίας του καλουπιού, οφείλεται στην μικρότερη θερμοκρασιακή διαφορά τήγματος και καλουπιού, που έχει ως αποτέλεσμα την πιο αργή στερεοποίηση και την ανάπτυξη ισχυρής πρόσφυσης ανάμεσα στις ζώνες στερεοποίησης του χυτού.

iii) Στην καμπύλη απόψυξης του χυτού:



Διάγραμμα 4. 42 Η επίδραση της αρχικής θερμοκρασίας καλουπιού, στην απόψυξη του χυτού, στα 20Hz

Η επίδραση της αρχικής θερμοκρασίας καλουπιού, είναι πιο εμφανής στο τρίτο χρονικό πεδίο μεταβολής της απόψυξης του χυτού κατά το οποίο η στερεοποίηση του έχει ολοκληρωθεί.

3. Επίδραση της επιτάχυνσης της μηχανής (ramp-up time):

Στις παρακάτω δοκιμές διατηρούμε σταθερούς τους παράγοντες της χύτευσης και μεταβάλλουμε μόνο την επιτάχυνση της χυτόπρεσας. Ο κατασκευαστής της φυγοκεντρικής μηχανής, δίνει τη δυνατότητα μεταβολής της από 0sec έως 650 sec. Θεωρώντας λογικές τιμές αυτές των 10sec και 20sec, ώστε να έχουν αναπτυχθεί φυγοκεντρικές δυνάμεις που θα επιτρέψουν την απόχυση του μετάλλου, πριν τη στερεοποίησή του, οι αλλαγές που παρουσιάστηκαν αφορούν:

i) Στο χρόνο στερεοποίησης του χυτού:

Πίνακας 4. 15 Η μεταβολή του χρόνου στερεοποίησης συναρτήσει του χρόνου επιτάχυνσης της μηχανής, για την ταχύτητα των 20Hz.

Επιτάχυνση (sec)	Solidification time (sec)
0	39.5
10	39.4
20	39.4

Από τον παραπάνω πίνακα διακρίνουμε τη μικρή επίδραση που έχει η επιτάχυνση της μηχανής στο χρόνο στερεοποίησης. Για να προσομοιώσουμε σωστά την παράμετρο της επιτάχυνσης, μέχρι την επίτευξη των μέγιστων αριθμών στροφών πρέπει να ορίσουμε τα εξής:

- ο Τη μεταβολή της παροχής μάζας τήγματος ανάλογα με την ταχύτητα περιστροφής, έως ότου επιτευχθούν οι μέγιστες rpm.
- ο Τη γραμμική μεταβολή των αριθμών στροφών περιστροφής (από 0 rpm έως μέγιστες καθορισμένες rpm)

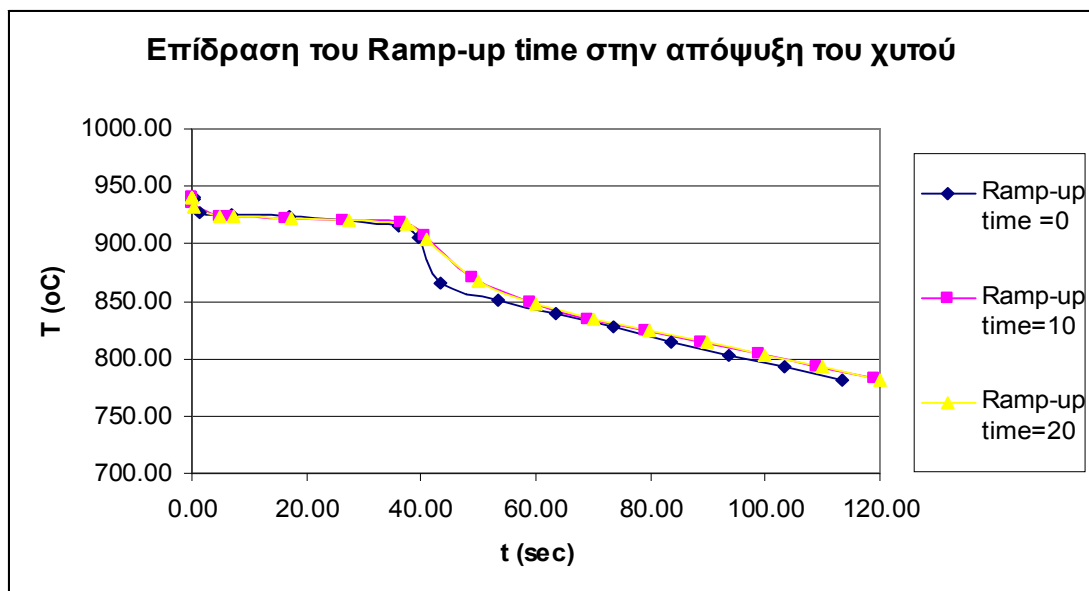
ii) Στο ποσοστό πορώδους του χυτού:

Πίνακας 4. 16 Η μεταβολή του πορώδους, συναρτήσει του χρόνου επιτάχυνσης της μηχανής, για την ταχύτητα των 20Hz.

Επιτάχυνση (sec)	Porosity (%)	Δporosity (%)
0	0.378	
10	0.00233	-99.3836
20	0.00233	-99.3836

Από τον παραπάνω πίνακα είναι φανερή η επίδραση της μικρής επιτάχυνσης της μηχανής (0 sec) στο ποσοστό πορώδους. Είναι δικαιολογημένη λοιπόν η ύπαρξη μακροπορώδους αφού οι μικρές φυγοκεντρικές δυνάμεις, δεν επιτρέπουν την ικανοποιητική συνοχή μεταξύ των στερεοποιούμενων τμημάτων του χυτού.

iii) Στην καμπύλη απόψυξης του χυτού:

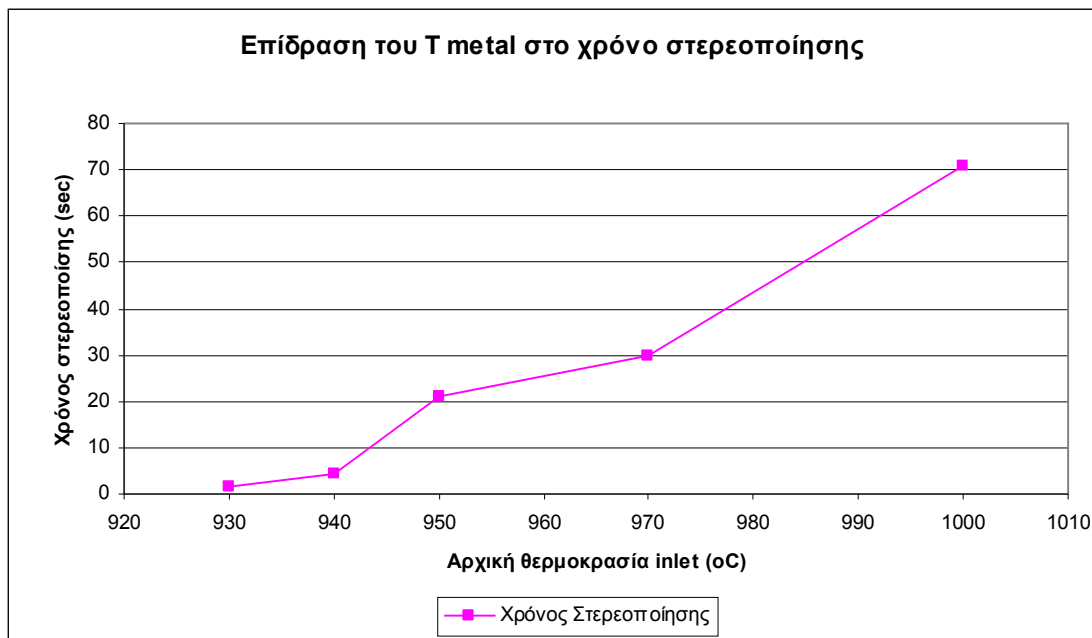


Διάγραμμα 4. 43 Η επίδραση του χρόνου επιτάχυνσης της μηχανής, στην απόψυξη του χυτού, στα 20Hz

Όπως παρατηρούμε από το παραπάνω διάγραμμα, η επίδραση του χρόνου επιτάχυνσης στην απόψυξη του χυτού είναι αμελητέα.

Επίδραση παραμέτρων χύτευσης στα 50Hz:**1. Η επίδραση του T_{metal} (θερμοκρασία τήγματος):****i) Στο χρόνο στερεοποίησης:****Πίνακας 4. 17** Η μεταβολή του χρόνου στερεοποίησης συναρτήσει της αρχικής θερμοκρασίας τήγματος, για την ταχύτητα των 50Hz.

T_{metal} (°C)	Solidification Time (sec)
930	1.52
940	4.43
950	21.19
970	29.85
1000	70.76

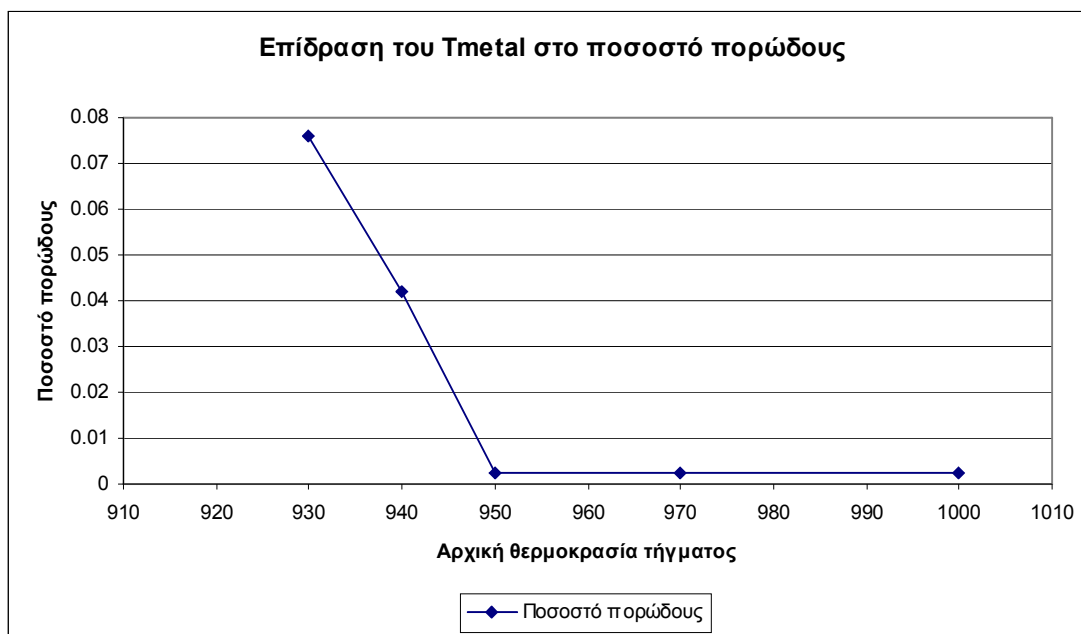
**Διάγραμμα 4 1:** Η επίδραση της αρχικής θερμοκρασίας τήγματος, στη στερεοποίηση του χυτού, στα 50Hz.

Και εδώ η αύξηση του χρόνου στερεοποίησης ήταν αναμενόμενη καθώς αυξάνεται η αρχική θερμοκρασία απόχυσης του τήγματος, λόγω του μεγαλύτερου απαιτούμενου χρόνου έως ότου το μέταλλο πέσει στη θερμοκρασία solidus.

ii) Στο ποσοστό πορώδους:

Πίνακας 4 1: Η μεταβολή του πορώδους, συναρτήσει της αρχικής θερμοκρασίας τήγματος, για την ταχύτητα των 50Hz.

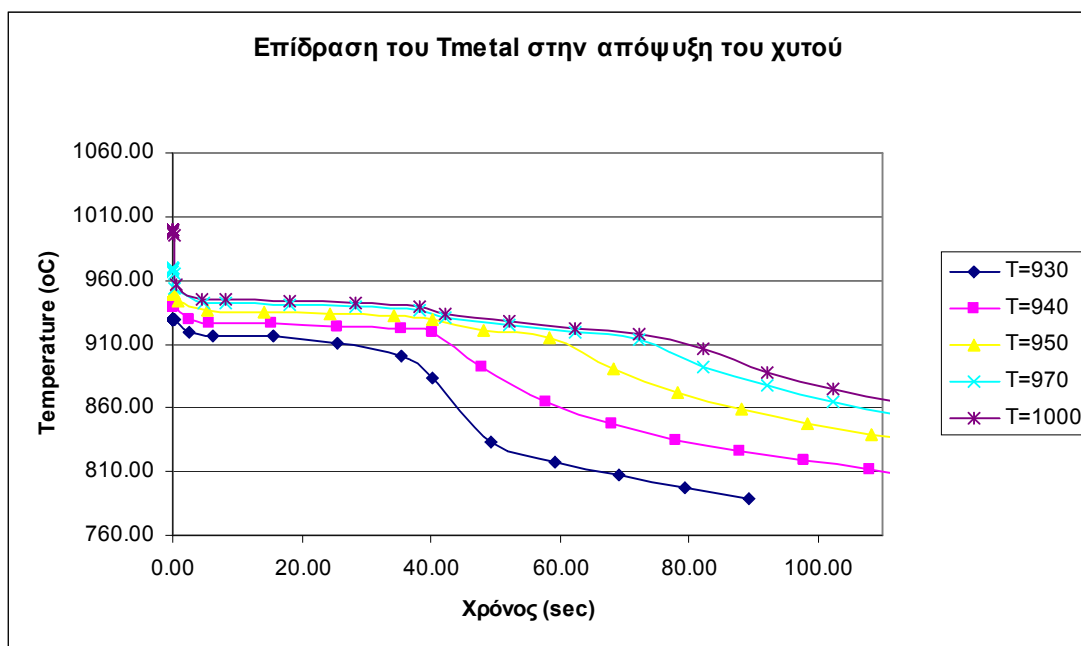
Tmetal (°C)	Porosity (%)	Δporosity (%)
930	0.076	
940	0.042	-44.73
950	0.00247	-96.75
970	0.00242	-96.81
1000	0.00241	-96.82



Διάγραμμα 4 2: Η επίδραση της αρχικής θερμοκρασίας τήγματος, στο πορώδες του χυτού, στα 50Hz.

Για την ταχύτητα των 50 Hz, διακρίνεται η μείωση του ποσοστού πορώδους που επέρχεται με την αύξηση της αρχικής θερμοκρασίας τήγματος. Η μείωση είναι σημαντική μέχρι και τους 950 °C ενώ περαιτέρω αύξηση πρακτικά δε μεταβάλλει σημαντικά το σχηματιζόμενο πορώδες.

iii) Στην καμπύλη απόψυξης του χυτού:



Διάγραμμα 4 3: Η επίδραση της αρχικής θερμοκρασίας τήγματος, στην απόψυξη του χυτού, στα 50Hz.

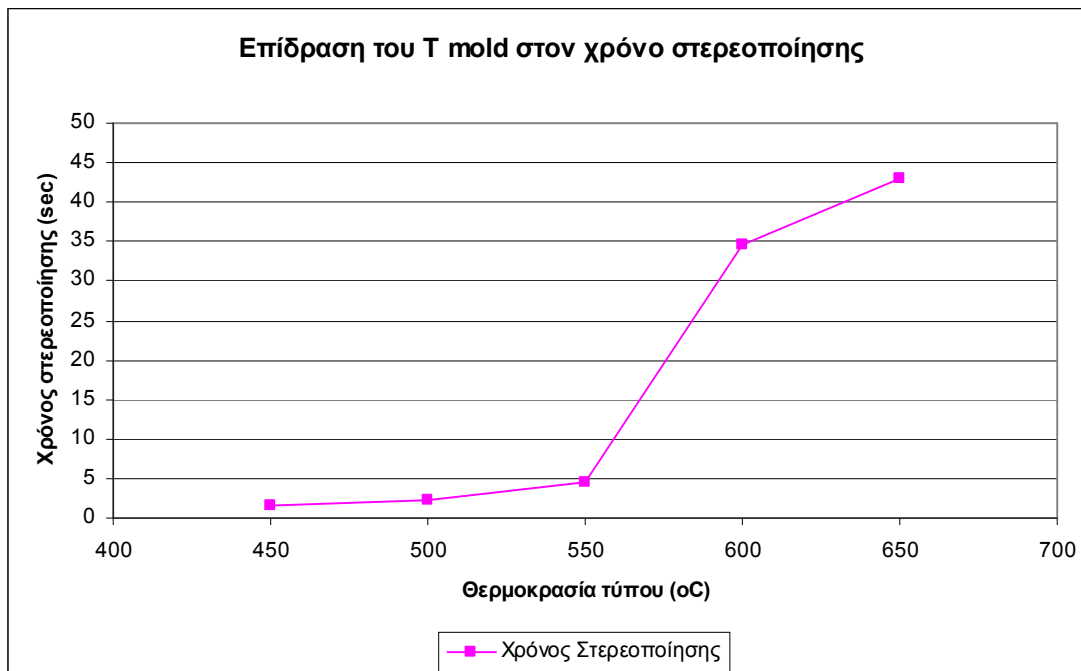
Η επίδραση της θερμοκρασίας τήγματος είναι και στην ταχύτητα των 50Hz φανερή σε όλη τη διάρκεια της απόψυξης του χυτού.

2. Η επίδραση του T_{mold} (θερμοκρασία τύπου):

ι) Στο χρόνο στερεοποίησης:

Πίνακας 4 2: Η μεταβολή του χρόνου στερεοποίησης συναρτήσει της αρχικής θερμοκρασίας καλουπιού, για την ταχύτητα των 50Hz.

T_{metal} (°C)	Solidification Time (sec)
450	1.64
500	2.29
550	4.43
600	35
650	42.96



Διάγραμμα 4 4: Η επίδραση της αρχικής θερμοκρασίας καλουπιού, στο χρόνο στερεοποίησης του χυτού, στα 50Hz

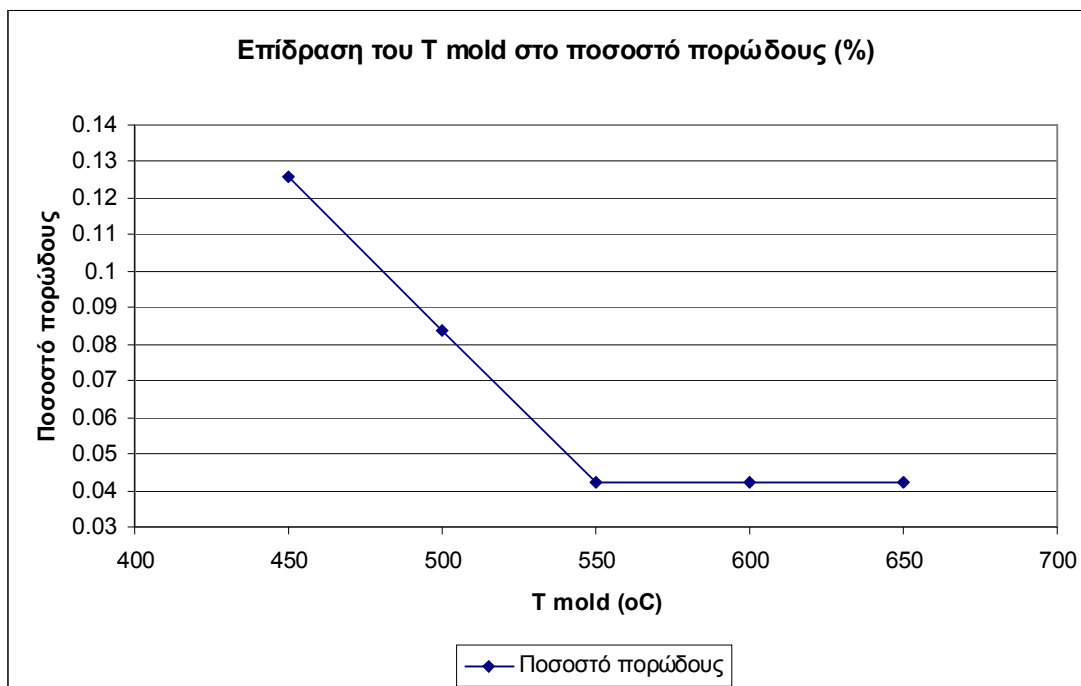
Και για την ταχύτητα των 50 Hz παρατηρείται η αναμενόμενη αύξηση του χρόνου στερεοποίησης του χυτού. Η επίδραση της θερμοκρασίας καλουπιού γίνεται ιδιαίτερα ισχυρή για θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 550 °C.

ii) Στο ποσοστό πορώδους:

Πίνακας 4 3: Η μεταβολή του πορώδους, συναρτήσει της αρχικής θερμοκρασίας καλουπιού, για την ταχύτητα των 50Hz.

Tmold (°C)	Porosity (%)	Δporosity (%)
450	0.126	
500	0.084	-33.33
550	0.042	-66.66
600	0.042	-66.66

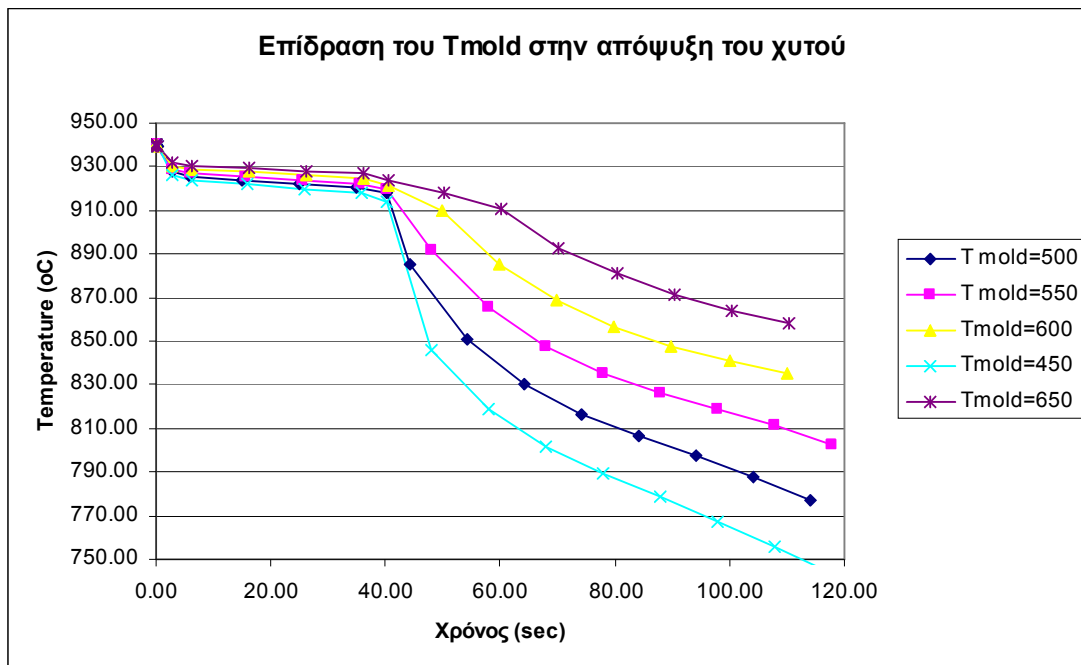
650	0.042	-66.66
-----	-------	--------



Διάγραμμα 4 5: Η επίδραση της αρχικής θερμοκρασίας καλουπιού, στο πορώδες του χυτού, στα 50Hz

Η μείωση στο ποσοστό του σχηματιζόμενου πορώδους λόγω αύξησης του Tmold είναι ισχυρή για θερμοκρασία έως 550 °C ενώ για περαιτέρω αύξηση παρατηρείται σταθεροποίησή του.

iii) Στην καμπύλη απόψυξης του χυτού:



Διάγραμμα 4 6: Η επίδραση της αρχικής θερμοκρασίας καλουπιού, στην απόψυξη του χυτού, στα 50Hz

Η καμπύλη απόψυξης του χυτού και για τα 50 Hz επηρεάζεται από τη θερμοκρασία καλουπιού, κυρίως, στο χρονικό διάστημα μετά το πέρας της στερεοποίησής του.

3. Επίδραση της επιτάχυνσης της μηχανής (ramp-up time):

i) Στο χρόνο στερεοποίησης του χυτού:

Πίνακας 4 4: Η μεταβολή του χρόνου στερεοποίησης συναρτήσει του χρόνου επιτάχυνσης της μηχανής, για την ταχύτητα των 50Hz.

Επιτάχυνση (sec)	Solidification time (sec)
0	4.43
10	4.49
20	4.49

Η επίδραση της επιτάχυνσης της μηχανής φαίνεται να είναι μικρή στο χρόνο στερεοποίησής του χυτού αφού δεν παρατηρείται μεγάλη μεταβολή του.

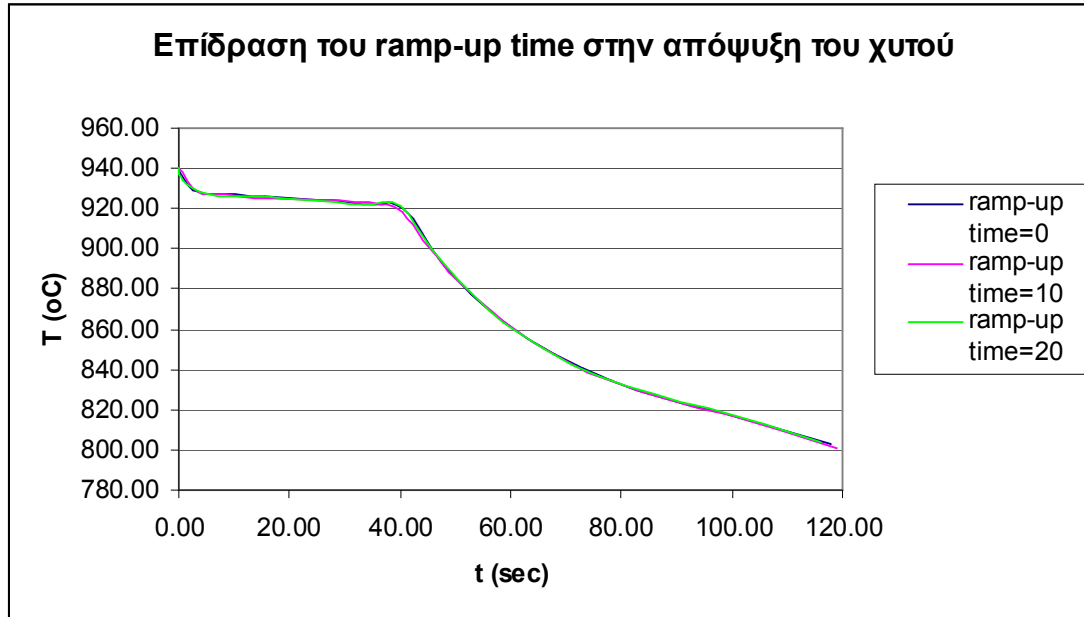
ii) Στο ποσοστό πορώδους:

Πίνακας 4 5: Η μεταβολή του πορώδους, συναρτήσει του χρόνου επιτάχυνσης της μηχανής, για την ταχύτητα των 50Hz.

Επιτάχυνση (sec)	Porosity (%)	Δporosity (%)
0	0.042	
10	0.00233	-94.45
20	0.00247	-94.11

Από τον παραπάνω πίνακα διακρίνεται η μεγάλη μείωση του ποσοστού πορώδους που επέρχεται με της αύξηση του χρόνου επιτάχυνσης. Ωστόσο παρουσιάζεται ανεπηρέαστο για μεγαλύτερη αύξηση του.

iii) Στην καμπύλη απόψυξης του χυτού:



Διάγραμμα 4 7: Η επίδραση του χρόνου επιτάχυνσης της μηχανής, στην απόψυξη του χυτού, στα 50Hz

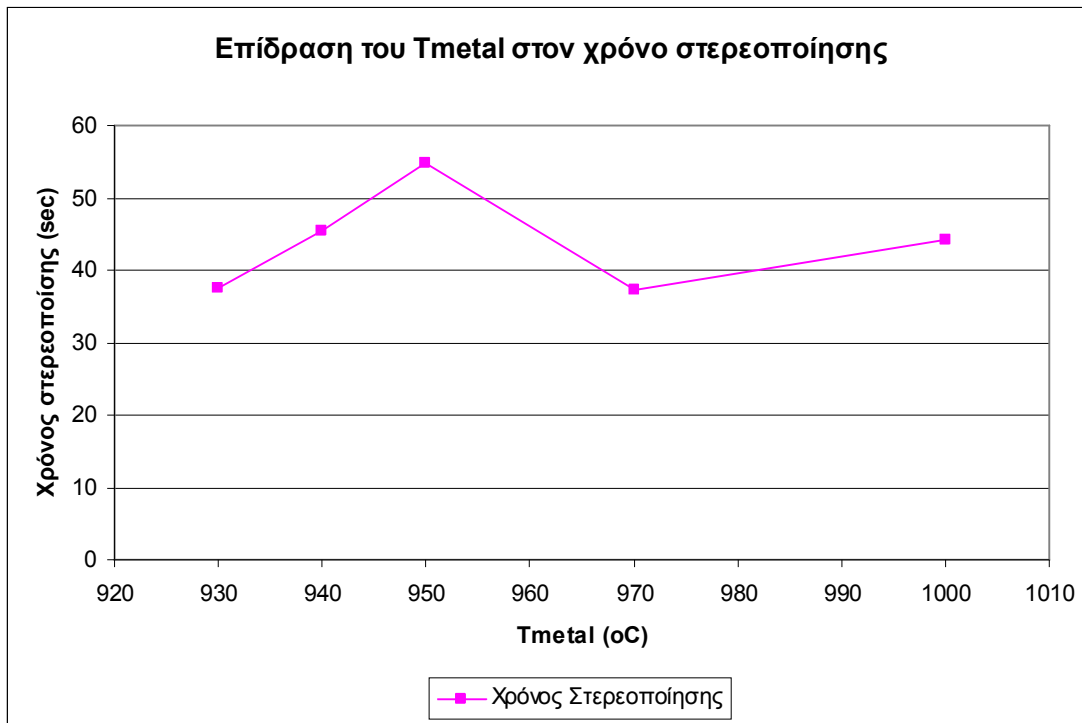
Η μικρή επίδραση του ramp-up time φαίνεται να είναι ασθενής σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα, όπου δεν παρουσιάζεται μεταβολή στην καμπύλη απόψυξης του χυτού.

Η επίδραση των παραμέτρων χύτευσης για την ταχύτητα των 60Hz είναι:**1. Η επίδραση του Tmetal (θερμοκρασία τήγματος):****i) Στο χρόνο στερεοποίησης:**

Διατηρώντας όλες τις άλλες παραμέτρους σταθερές και μεταβάλλοντας μόνο τη θερμοκρασία εισαγωγής του τηγμένου μετάλλου έχουμε τις εξής μεταβολές:

Πίνακας 4 6: Η μεταβολή του χρόνου στερεοποίησης συναρτήσει της αρχικής θερμοκρασίας τήγματος, για την ταχύτητα των 60Hz.

T metal (°C)	Solidification Time (Sec)
930	37.47
940	45.39
950	54.7
970	37.24
1000	44.08



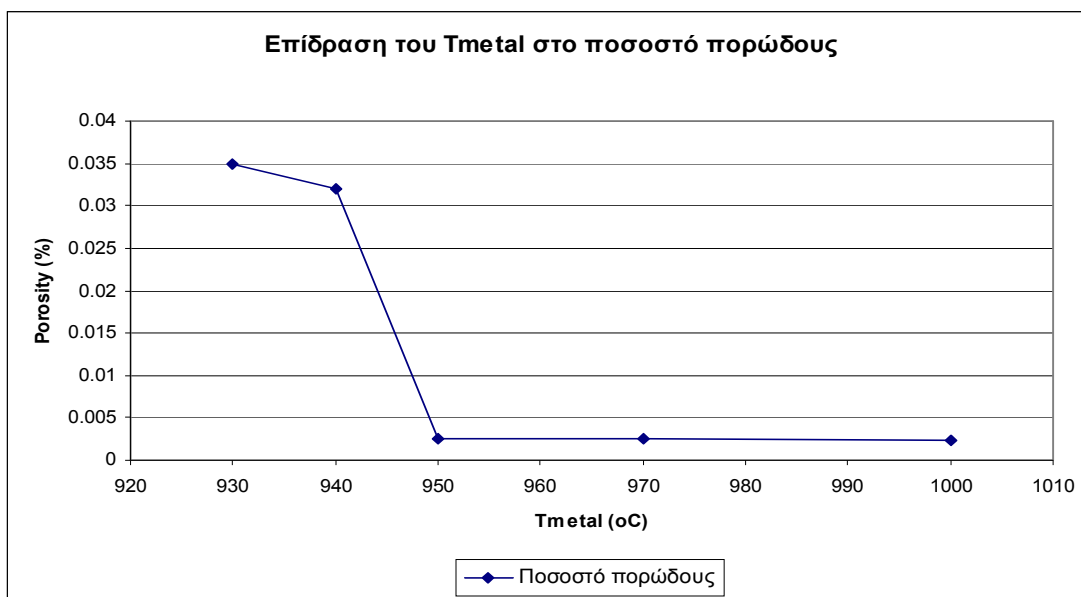
Διάγραμμα 4 8: Η επίδραση της αρχικής θερμοκρασίας τήγματος, στη στερεοποίηση του χυτού, στα 60Hz.

Για ταχύτητα περιστροφής 60Hz, παρατηρείται αύξηση του χρόνου στερεοποίησης έως $T_{\text{metal}}=950^{\circ}\text{C}$. Για $T_{\text{metal}}=970^{\circ}\text{C}$ εμφανίζεται μείωση του που ακολουθείται από εκ νέου αύξηση του.

ii) Στο ποσοστό πορώδους στο χυτό:

Πίνακας 4 7: Η μεταβολή του πορώδους, συναρτήσει της αρχικής θερμοκρασίας τήγματος, για την ταχύτητα των 60Hz.

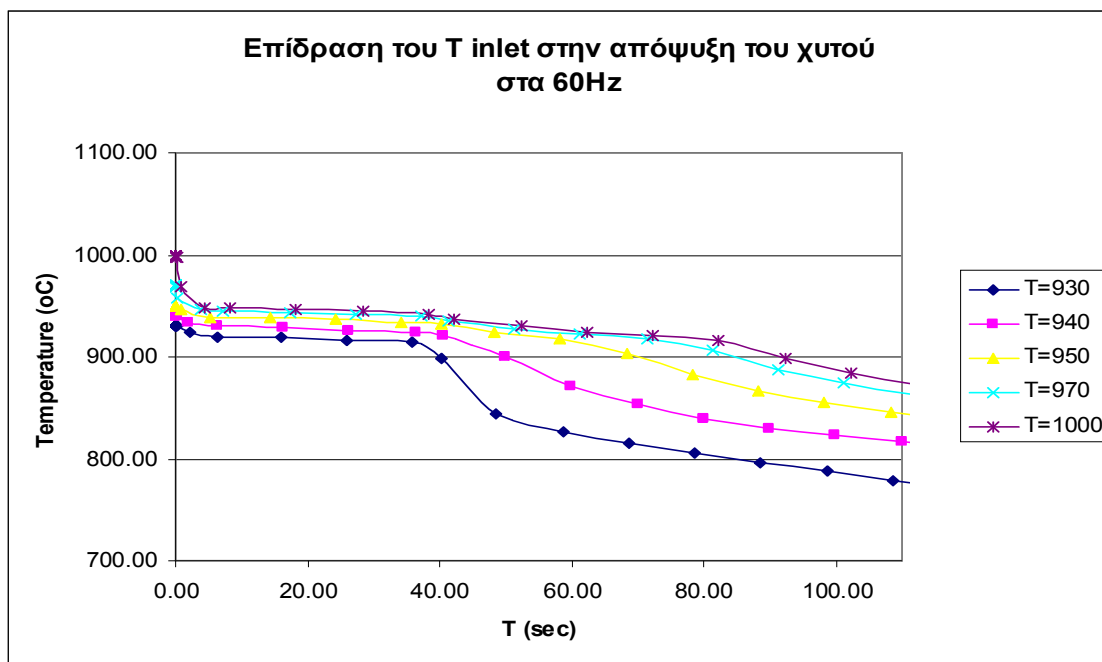
$T_{\text{metal}} (^{\circ}\text{C})$	Porosity (%)	$\Delta\text{porosity} (%)$
930	0.035	
940	0.032	-8.571
950	0.0026	-92.57
970	0.0025	-92.85
1000	0.0024	-93.14



Διάγραμμα 4 9: Η επίδραση της αρχικής θερμοκρασίας τήγματος, στο πορώδες του χυτού, στα 60Hz

Το ποσοστό σχηματιζόμενου πορώδους μειώνεται συνεχώς καθώς αυξάνεται η αρχική θερμοκρασία τηγμένου μετάλλου, μείωση η οποία είναι ιδιαίτερα ισχυρή έως τους 950°C .

iii) Στην καμπύλη απόψυξης του χυτού:



Διάγραμμα 4 10: Η επίδραση της αρχικής θερμοκρασίας τήγματος, στην απόψυξη του χυτού, στα 60Hz.

Αναμενόμενη ήταν και για την ταχύτητα των 60Hz η επίδραση της αρχικής θερμοκρασία τήγματος στην απόψυξη του χυτού. Έτσι μια αρχικά υψηλή θερμοκρασία απόχυσης του κράματος συνοδεύεται από μετατόπιση ολόκληρης της καμπύλης απόψυξης προς υψηλότερες θερμοκρασίες.

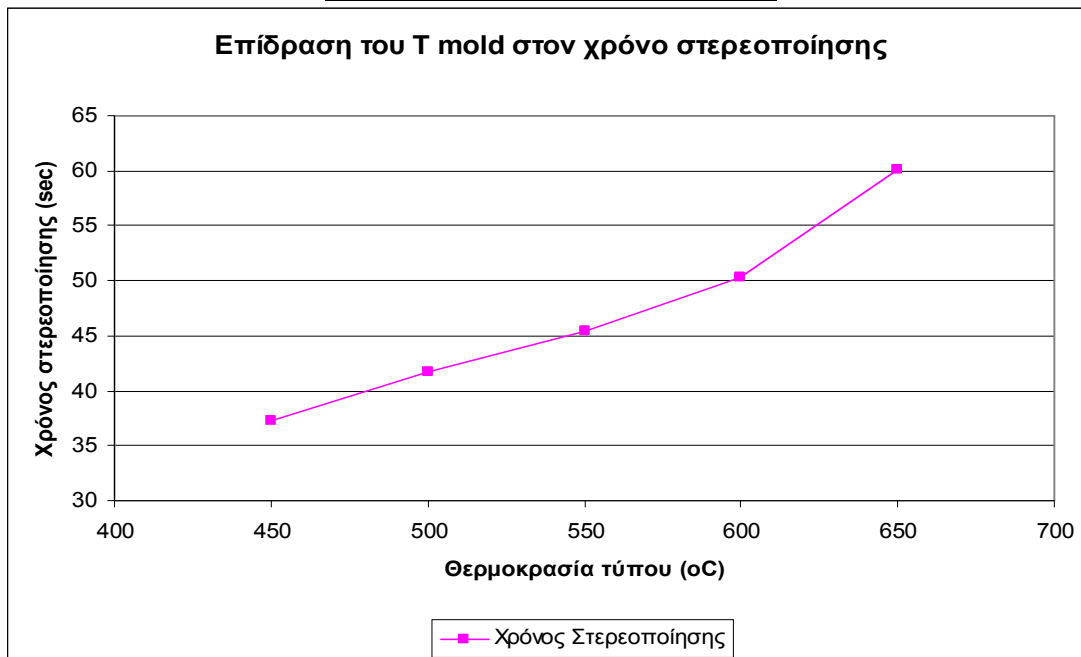
2. Η επίδραση του Tmold (θερμοκρασία τύπου):

Και σε αυτήν την περίπτωση, κρατάμε σταθερές όλες τις παραμέτρους της χύτευσης και μεταβάλλουμε μόνο την θερμοκρασία του καλουπιού. Έτσι, έχουμε τα παρακάτω αποτελέσματα:

ι) Στο χρόνο στερεοποίησης:

Πίνακας 4 8: Η μεταβολή του χρόνου στερεοποίησης συναρτήσει της αρχικής θερμοκρασίας καλουπιού, για την ταχύτητα των 60Hz.

Tmold (°C)	Solidification time (sec)
450	37.26
500	41.67
550	45.39
600	50.32
650	60.18



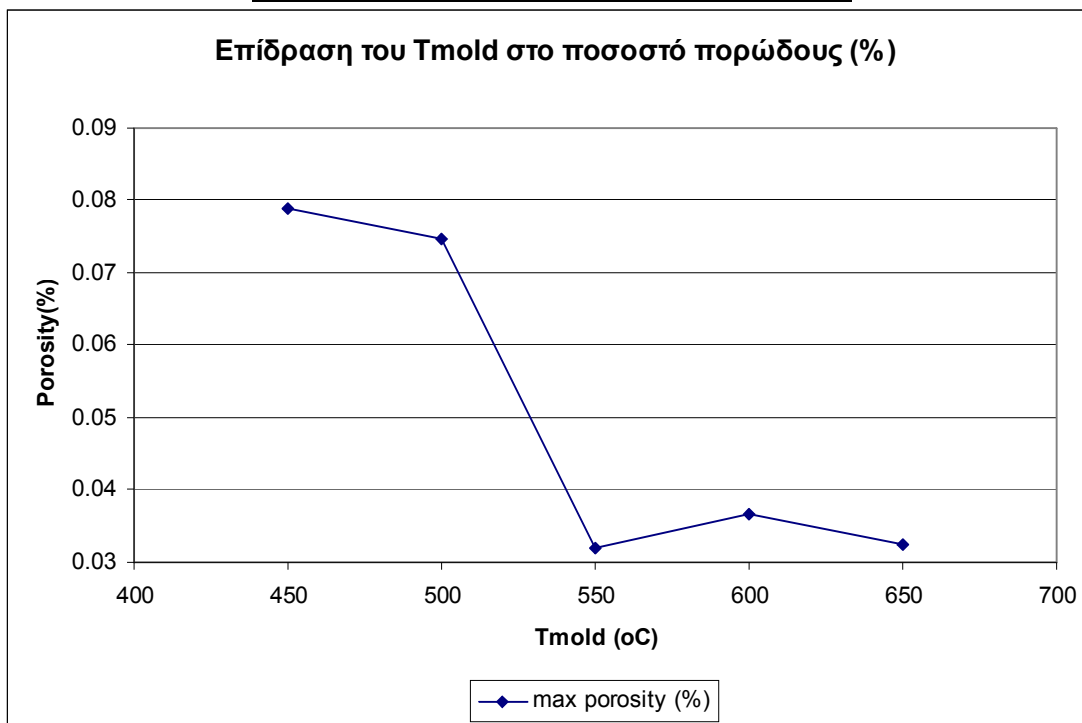
Διάγραμμα 4 11: Η επίδραση της αρχικής θερμοκρασίας καλουπιού, στο χρόνο στερεοποίησης του χυτού, στα 60Hz

Για ταχύτητα περιστροφής 60Hz παρατηρείται ομαλή αύξηση του χρόνου στερεοποίησης καθώς αυξάνουμε την αρχική θερμοκρασία καλουπιού.

ii) Στο ποσοστό πορώδους:

Πίνακας 4 9: Η μεταβολή του πορώδους, συναρτήσει της αρχικής θερμοκρασίας καλουπιού, για την ταχύτητα των 60Hz.

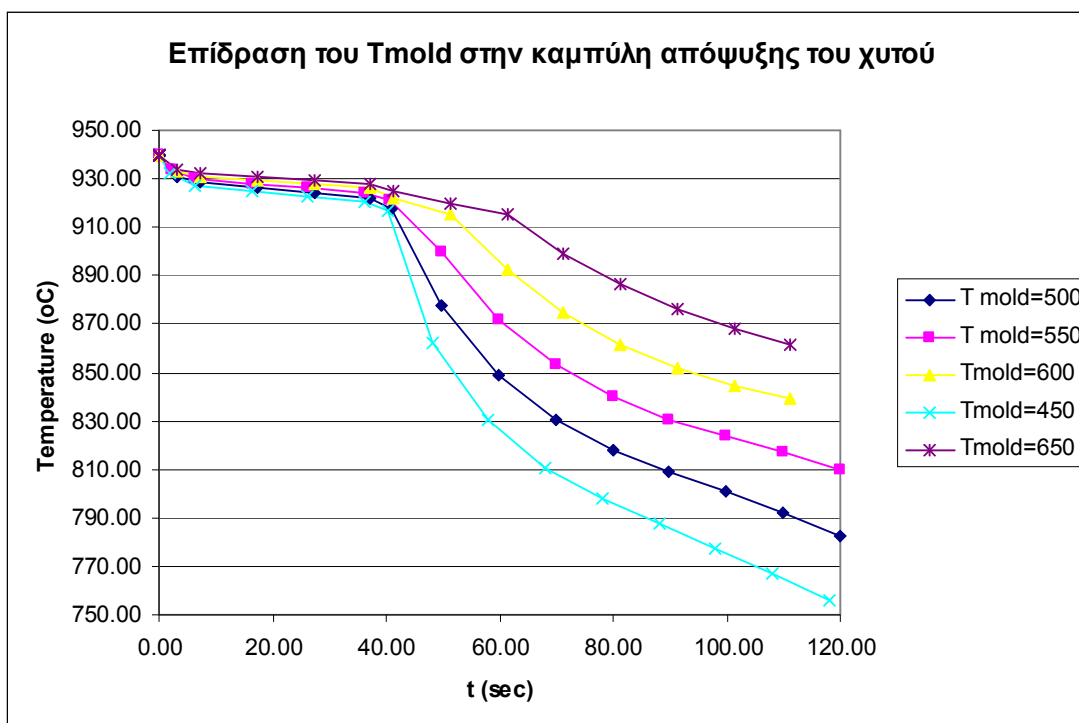
Tmold (°C)	Porosity (%)	Δporosity (%)
450	0.0755	
500	0.0747	-1.05
550	0.0373	-50.59
600	0.032	-57.61
650	0.02	-73.50



Διάγραμμα 4 12: Η επίδραση της αρχικής θερμοκρασίας καλουπιού, στο πορώδες του χυτού, στα 60Hz

Και για ταχύτητα περιστροφής 60Hz επέρχεται μείωση του σχηματιζόμενου πορώδους καθώς αυξάνεται η αρχική θερμοκρασία καλουπιού.

iii) Στην καμπύλη απόψυξης του χυτού:



Διάγραμμα 4 13: Η επίδραση της αρχικής θερμοκρασίας καλουπιού, στην απόψυξη του χυτού, στα 60Hz

Η επίδραση της αρχικής θερμοκρασίας καλουπιού στην καμπύλη απόψυξης του χυτού, ήταν η αναμενόμενη όπως και για τις ταχύτητες περιστροφής των 20Hz και 50Hz. Έτσι φαίνεται η επίδρασή της μόνο κατά την τρίτη χρονική περίοδο, μετά το πέρας της στερεοποίησης.

3. Επίδραση της επιτάχυνσης της μηχανής (ramp-up time):

Στις παρακάτω δοκιμές διατηρούμε σταθερούς τους παράγοντες της χύτευσης και μεταβάλλουμε μόνο την επιτάχυνση της χυτόπρεσας. Οι αλλαγές που παρουσιάζονται αφορούν:

i) Στο χρόνο στερεοποίησης του χυτού:

Πίνακας 4 10: Η μεταβολή του χρόνου στερεοποίησης συναρτήσει του χρόνου επιτάχυνσης της μηχανής, για την ταχύτητα των 60Hz.

Επιτάχυνση (sec)	Solidification time (sec)
0	45.39
10	45.37
20	45.51

Ο χρόνος στερεοποίησης του χυτού δε φαίνεται να επηρεάζεται σημαντικά από το χρόνο επιτάχυνσης της μηχανής και για ταχύτητας περιστροφής 60Hz.

ii) Στο ποσοστό πορώδους του χυτού:

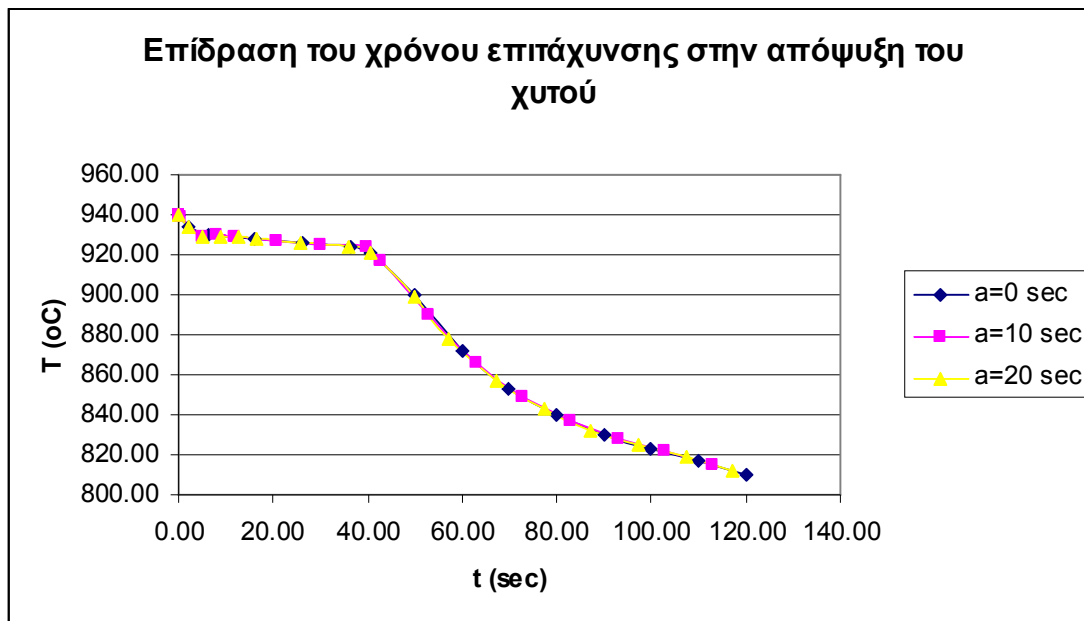
Πίνακας 4 11: Η μεταβολή του πορώδους, συναρτήσει του χρόνου επιτάχυνσης της μηχανής, για την ταχύτητα των 60Hz.

Επιτάχυνση (sec)	Porosity (%)	Δporosity (%)
0	0.032	

10	0.0784	145.00
20	0.00213	-93.34

Από τον παραπάνω πίνακα διακρίνεται σημαντική αύξηση του ποσοστού πορώδους για Ramp-up time=10 sec, η οποία δεν εμφανίστηκε για ταχύτητα περιστροφής 20Hz και 50Hz. Ωστόσο για Ramp-up time=20 sec επέρχεται σημαντική μείωσή του.

iii) Στην απόψυξη του χυτού:



Διάγραμμα 4 14: Η επίδραση του χρόνου επιτάχυνσης της μηχανής, στην απόψυξη του χυτού, στα 60Hz

Η επίδραση του χρόνου επιτάχυνσης είναι ασθενής και για την ταχύτητα των 60Hz, στην απόψυξη του χυτού.

4.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων Χύτευσης Βαρύτητας και Φυγοκεντρικής, για Direct Modeling.

4.3.1. Χύτευση Βαρύτητας:

Από την παράθεση των αποτελεσμάτων, στην Παράγραφο 4.1, επιβεβαιώνεται η θεωρητική συμπεριφορά του Σ.Μ.Θ που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 2. Διακρίνουμε δηλαδή κατά την υγρή φάση του μετάλλου το πρώτο στάδιο, με υψηλό ρυθμό μετάδοσης θερμότητας, το δεύτερο στάδιο που το κράμα βρίσκεται σε ρευστή φάση αλλά σε θερμοκρασία μικρότερη αυτής της solidus, όπου ο Σ.Μ.Θ πέφτει αισθητά και τέλος το τελευταίο στάδιο μεταβολής, στο οποίο έχουμε αύξηση της τιμής λόγω μικρής θερμοκρασίας καλουπιού.

Σημαντική κρίνεται και η μεταβολή του χρόνου στερεοποίησης συναρτήσει της αρχικής θερμοκρασία του τήγματος. Η ομοιόμορφη μεταβολή του, με την αύξηση του T_{metal} , ήταν αναμενόμενη και επαληθεύτηκε και από τη διαδικασία της προσομοίωσης. Από το Διάγραμμα 1, φαίνεται ότι η στερεοποίηση επιτυγχάνεται περίπου στα 100 sec,

γεγονός αναμενόμενο, αφού το θερμοστοιχείο ήταν τοποθετημένο στο πιο παχύ τμήμα του χυτού, το οποίο στερεοποιείται πιο αργά.

Επίσης, μεγάλη επίδραση στο πορώδες του χυτού εμφανίζουν να έχουν οι υψηλές θερμοκρασίες καλουπιού και τήγματος. Είναι φανερό, ότι τα μικρότερα ποσοστά πορώδους επιτυγχάνονται όταν δεν υπάρχει μεγάλη θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ λιωμένου μετάλλου και καλουπιού (επομένως έχουμε πιο αργή στερεοποίηση) πχ για $T_{metal}=955^{\circ}C$ και $T_{mold}=550^{\circ}C$ έχουμε $Porosity=0.1343\%$, ενώ διατηρώντας το T_{metal} σταθερό και έχοντας $T_{mold}=750^{\circ}C$, τότε $Porosity=0.00294\%$.

Τέλος παρατηρήθηκε, αδυναμία πλήρωσης του καλουπιού για αρχική θερμοκρασία $T_{metal}=930^{\circ}C$ και $T_{metal}=940^{\circ}C$. Αυτό οφείλεται στην υψηλή αποβολή θερμότητας κατά το πρώτο στάδιο μεταβολής του Σ.Μ.Θ σε συνδυασμό με τη μεγάλη απόσταση που διανύει το τήγμα έως ότου εισέλθει στην κοιλότητα του καλουπιού, που έχει ως αποτέλεσμα τη μετάδοση θερμότητας σε μεγάλο τμήμα του τύπου και επομένως τη γρηγορότερη στερεοποίησή του.

4.3.2. Φυγοκεντρική χύτευση:

Παρόμοια συμπεριφορά του Σ.Μ.Θ παρατηρείται και στην περίπτωση της φυγοκεντρικής χύτευσης. Ωστόσο εξαιτίας της βεβαιωμένης διαδικασίας απορροής του τήγματος στο καλούπι λόγω της περιστροφής, τα στάδια μεταβολής του είναι πιο σαφώς καθορισμένα. Και εδώ λοιπόν διακρίνουμε τις τρεις περιοχές μεταβολής του Σ.Μ.Θ, τόσο για την περίπτωση μέτρησής του στο χυτό, όσο και στον κορμό. Η βασικότερη διαφορά που παρατηρήθηκε, είναι η εξάρτησή του από την ταχύτητα περιστροφής της μηχανής. Πιο συγκεκριμένα, προσομοιώνοντας τη διαδικασία χύτευσης με σταθερές θερμοκρασίες τήγματος και καλουπιού, $T_{metal}=940^{\circ}C$ $T_{mold}=550^{\circ}C$ αντίστοιχα και Σ.Μ.Θ αυτούς που βρέθηκαν στην Παράγραφο 4.2 είχαμε την ακόλουθη μεταβολή στο χρόνο στερεοποίησης:

Πίνακας 4 12: Η στερεοποίηση του χυτού, όπως προκύπτει από την προσομοίωση, για όλες τις ταχύτητες περιστροφής της μηχανής.

Hz	Solidification time (sec)
20	11.27
30	5.01
40	4.85
50	4.42
60	1.21

Τα παραπάνω αποδεικνύουν, την ισχυρή εξάρτηση του χρόνου στερεοποίησης, από την αύξηση της ταχύτητας περιστροφής, γεγονός που οφείλεται στην αυξημένη πίεση του χυτού πάνω στα τοιχώματα του καλουπιού. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται μεγαλύτερη επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας και επομένως ταχύτερη αποβολή της προς το περιβάλλον. Τα συγκεκριμένο φαινόμενο επαληθεύτηκε και κατά την πειραματική διαδικασία, στις περιπτώσεις όπου είχαμε παρόμοιες αρχικές συνθήκες και επομένως σχετικά ίδιους συντελεστές μετάδοσης. Όπως διακρίνουμε και από τις πειραματικές καμπύλες μέτρησης στα 50Hz και στα 60Hz, κατά τις οποίες παρουσιάστηκαν εφάμιλλες θερμοκρασίες τήγματος και καλουπιού είχαμε τους εξής χρόνους στερεοποίησης:

Πίνακας 4 13: Η στερεοποίηση του χυτού, κατά την εκτέλεση πειραμάτων για ταχύτητα 50Hz και 60Hz.

Hz	Solidification time (sec)
50	18.642
60	13.804

Η ταχύτητα περιστροφής, όμως, επιδρά σημαντικά και στο ποσοστό του σχηματιζόμενου πορώδους. Είναι χαρακτηριστική η μείωση που επιτυγχάνεται με την αύξηση των στροφών της μηχανής. Έτσι ενώ στα 20Hz για $T_{\text{metal}}=940\text{ }^{\circ}\text{C}$ και $T_{\text{mold}}=550\text{ }^{\circ}\text{C}$ τότε Porosity=0,378% ενώ για ίδιες αρχικές συνθήκες στα 60Hz Porosity=0,0373%.

Επίσης λογική κρίνεται και η αύξηση του χρόνου στερεοποίησης καθώς μεγαλώνει η αρχική θερμοκρασία μετάλλου και καλουπιού. Ανάλογη είναι και η συμπεριφορά του ποσοστού πορώδους, το οποίο ακολουθεί πτωτική πορεία όσο αυξάνεται η θερμοκρασία του μετάλλου αλλά και του καλουπιού. Όσον αφορά, τη γενική πορεία απόψυξης του χυτού, μπορούμε να πούμε ότι η επίδραση του T_{metal} είναι εμφανέστερη σε όλη τη διάρκειά της, ενώ αντίθετα το T_{mold} επηρεάζει κυρίως το τρίτο στάδιο μεταβολής του Σ.Μ.Θ, κατά το οποίο έχει ήδη ολοκληρωθεί η στερεοποίηση του χυτού.

Η επίδραση του χρόνου επιτάχυνσης της μηχανής φαίνεται να είναι σημαντική μόνο για το ποσοστό του πορώδους. Αντιθέτως, η διαδικασία της στερεοποίησης δεν εξαρτάται σημαντικά από την επιτάχυνση της μηχανής αφού για όλες τις τιμές της δεν παρατηρείται σημαντική διαφοροποίηση. Επισημαίνεται ωστόσο η αδυναμία του προγράμματος να προσομοιώσει μεταβλητή παροχή τήγματος καθώς το καλούπι αυξάνει την ταχύτητά του. Έτσι το πρόγραμμα θεωρεί σταθερή παροχή τήγματος από την αρχή της περιστροφής (0 rpm) έως την επίτευξη της μέγιστης ταχύτητας (470 rpm).

Τέλος, παρατηρώντας τις τιμές του ΣΜΘ για το Σημείο Α (Σχ. 4.20) και το Σημείο Β (Σχ. 4.21) βλέπουμε τη μεγάλη διαφορά που εμφανίζουν μεταξύ τους. Η μεγάλη αύξηση οφείλεται καταρχάς στη μικρή διάμετρο του αγωγού τροφοδοσίας (6mm), όπου λόγω μικρού όγκου τήγματος που συγκεντρώνεται στην περιοχή αυτή επιτυγχάνεται ταχύτερη στερεοποίηση και επομένως μεγάλες τιμές του Σ.Μ.Θ. Ακόμα, η περιοχή του καλουπιού γύρω από τον αγωγό έχει πολύ μεγαλύτερο πάχος, γεγονός που ευνοεί την πολύ γρήγορη αποβολή θερμότητας προς το γύψο και ακολούθως προς το περιβάλλον. Ωστόσο χαρακτηριστικό των τιμών του Σ.Μ.Θ είναι η μικρή διακύμανση που παρουσιάζουν, εμφανίζοντας μικρότερη εξάρτηση από την ταχύτητα περιστροφής. Η συμπεριφορά αυτή είναι αποτέλεσμα της θέσης του σημείου που υπολογίστηκε, το οποίο βρίσκεται πολύ κοντά στην οπή τροφοδοσίας του τήγματος, αλλά και της συμμετρίας όλου του χυτού, παράγοντες που μετριάζουν της επίδραση της αυξημένης ταχύτητας, πίεσης και παροχής λιωμένου μετάλλου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συμπεράσματα μελέτης:

Τα συμπεράσματα της έρευνας ήταν τα ακόλουθα:

- Ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας μεταβάλλεται συναρτήσει του χρόνου. Διακρίνονται τρεις χαρακτηριστικές περιοχές, όπως αναμενόταν και από τη θεωρητική ανάλυση που περιγράφεται στη βιβλιογραφία:
Η πρώτη περιοχή κατά την υγρή φάση του μετάλλου, με υψηλό ρυθμό μετάδοσης θερμότητας, η δεύτερη περιοχή κατά την οποία ο συντελεστής πέφτει αισθητά, και η τρίτη περιοχή κατά την οποία η τιμή του μειώνεται σημαντικά.
- Η ταχύτητα περιστροφής επηρεάζει το συντελεστή μετάδοσης θερμότητας από το τήγμα προς το καλούπι, πράγμα που συνεπάγεται αλλαγές στον τρόπο στερεοποίησης. Σε μεγαλύτερες ταχύτητες περιστροφής, η τιμή του συντελεστή στην πρώτη και στην τρίτη περιοχή μεγαλώνει, και μειώνεται στη δεύτερη περιοχή. Η αύξηση της τιμής οφείλεται στην αυξημένη πίεση του χυτού πάνω στα τοιχώματα του καλουπιού.
- Η ταχύτητα περιστροφής της χυτόπρεσας επηρεάζει άμεσα την παροχή τήγματος στο καλούπι και ως εκ τούτου την ποιότητα πλήρωσης του τύπου.
- Παρατηρήθηκε η εξάρτηση της τιμής του συντελεστή μετάδοσης και από τη θέση του χυτού, αφού είχαμε διαφορετικά αποτελέσματα για ίδια ταχύτητα περιστροφής, σε διαφορετικά σημεία του χυτού.
- Η προσπάθεια επίλυσης του Αντίστροφου Προβλήματος για την εύρεση του συντελεστή, που παρέχει το PROCAST, δεν οδήγησε σε ικανοποιητικό αποτέλεσμα. Αυτό οφείλεται στο μεγάλο υπολογιστικό φορτίο και στην ισχυρή εξάρτηση του αποτελέσματος από την αρχική εκτίμηση που ορίζουμε σαν είσοδο του προβλήματος.
- Με αύξηση της θερμοκρασίας του τήγματος, ο μέγιστος χρόνος στερεοποίησης μεγαλώνει ενώ ο ελάχιστος χρόνος στερεοποίησης παραμένει μικρός.
- Η ταχύτητα περιστροφής επιδρά σημαντικά και στο ποσοστό του σχηματιζόμενου πορώδους. Είναι χαρακτηριστική η μείωση που επιτυγχάνεται με την αύξηση των στροφών της μηχανής. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι ενώ στα 20Hz για θερμοκρασία μετάλλου 940 °C και θερμοκρασία καλουπιού 550 °C, το μέγιστο ποσοστό εμφανιζόμενου πορώδους στο χυτό είναι 0,378%, ενώ για τις ίδιες αρχικές συνθήκες στα 60Hz το ποσοστό πορώδους πέφτει στο 0,0373 %.

- ο Το ποσοστό του πορώδους μειώνεται πάρα πολύ όταν το μέταλλο έχει αρχική θερμοκρασία πολύ υψηλότερη από το σημείο τήξης. Η απόψυξη στην περίπτωση αυτή είναι πολύ ομαλή και η δημιουργία πορώδους πολύ περιορισμένη. Είναι λοιπόν, επιθυμητή η μεγάλη υπέρτηξη, αλλά υπάρχει ο περιορισμός ότι η υψηλή θερμοκρασία τήγματος οξειδώνει το μέταλλο και προκαλεί μαύρισμα της επιφάνειας.
- ο Ο μέγιστος χρόνος στερεοποίησης μεταβάλλεται ομαλά με τη θερμοκρασία του καλουπιού.
- ο Η διάρκεια φυγοκέντρισης πρέπει να ρυθμίζεται ώστε να είναι μεγαλύτερη από το μέγιστο χρόνο στερεοποίησης του τεμαχίου.
- ο Πολύ σημαντικό ρόλο στην τελική ποιότητα του χυτού και τη δημιουργία ατελειών παίζει η διάταξη του δέντρου χύτευσης και η τοποθέτησή του ως προς το επίπεδο περιστροφής. Τα σημεία του καλουπιού που βρίσκονται κατάντι της ροής είναι ευάλωτα στο σχηματισμό μακροπορώδους. Αν και η κατάλληλη επιλογή συνθηκών χύτευσης μπορεί να περιορίσει πάρα πολύ το πρόβλημα, υπάρχουν ωστόσο περιπτώσεις που λόγω της γεωμετρίας του τεμαχίου η αποφυγή δημιουργίας ελαττώματος είναι πολύ δύσκολη, και για αυτό προτείνεται αλλαγή της διάταξης του δέντρου χύτευσης.
- ο Όταν η θερμοκρασιακή διαφορά καλουπιού-τήγματος είναι μεγάλη τότε παρουσιάζεται μεγαλύτερη ανομοιομορφία στερεοποίησης.
- ο Επιθυμητή είναι η μικρή θερμοκρασιακή διαφορά καλουπιού-τήγματος για τη μείωση του πορώδους

Αξίζει να σημειώσουμε πως η γνώση συγκεκριμένης τιμής του συντελεστή μετάδοσης θερμότητας αποτελεί σημαντικό εργαλείο για την προσομοίωση και βελτιστοποίηση διαδικασιών χύτευσης χωρίς την ανάγκη εκτέλεσης χρονοβόρων και δαπανηρών πειραμάτων, επιπλέον η εφαρμογή των παραπάνω συμπερασμάτων οδηγεί στη χύτευση αντικειμένων καλύτερης ποιότητας και μηχανικών ιδιοτήτων, ελαχιστοποιώντας το κόστος παραγωγής.

Τελικά, προέκυψαν: ένας συντελεστής για τη χύτευση βαρύτητας και πέντε διαφορετικοί συντελεστές μετάδοσης θερμότητας (ένας για κάθε ταχύτητα περιστροφής) για τη φυγοκεντρική χύτευση. Επιπλέον βρέθηκαν ακόμα πέντε τιμές του Συντελεστή

Μετάδοσης Θερμότητας για κάθε ταχύτητα περιστροφής σε σημείο που βρίσκεται στον κεντρικό αγωγό τροφοδοσίας. Τα αποτελέσματα φαίνονται παρακάτω:

1.Χύτευση βαρύτητας:

$$h = \begin{cases} 1500 \text{ W/m}^2\text{K}, & 0 < t < 2\text{sec} \\ 3200 \text{ W/m}^2\text{K}, & 2 < t < 120\text{sec} \\ 100 \text{ W/m}^2\text{K}, & t \geq 120\text{sec} \end{cases}$$

2.Φυγοκεντρική Χύτευση (Σημείο Α) (Εικ. 4.20)

Hz \ t	0-5 sec	5-40 sec	40-120 sec
20	5000	80	3000
30	8000	3000	6000
40	7000	2000	7000
50	1200	50	1500
60	600	50	1000

3.Φυγοκεντρική Χύτευση (Σημείο Β) (Εικ. 4.21)

Hz \ t	0-5 sec	5-40 sec	40-120sec
20	30000	16000	20000
30	30000	13000	16000
40	30000	15000	16000
50	18000	28000	30000
60	28000	28000	30000

Τέλος, προτείνεται πιο εκτεταμένη διερεύνηση του συντελεστή από τις παραμέτρους που μελετήθηκαν κάνοντας χρήση μεγαλύτερου αριθμού θερμοστοιχείων, ώστε να έχουμε πιο σαφή προσδιορισμό της μεταβολής του σε μεγαλύτερο εύρος της επιφάνειας του χυτού. Επίσης προτείνεται η χρήση διαφορετικών μηχανών χύτευσης με ακόμα περισσότερες παραμέτρους ελέγχου. Σημαντική θα ήταν ακόμα η μελέτη των δυνατοτήτων του προγράμματος προσομοίωσης PROCAST, για την εύρεση του Συντελεστή Μετάδοσης Θερμότητας, μέσω της επίλυσης του αντίστροφου προβλήματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Ι. Δ. Χρυσουλάκης, Δ.Ι. Παντελής: 'Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών', Εκδ. Παπασωτηρίου, 1996
2. Γ. Βοσνιάκος: 'Μέθοδοι Χύτευσης', 'Επιλογή μεθόδου χύτευσης', 'Σχεδίαση χυτών'
3. Ι. Χ. Μπαρδής: 'Χύτευσις', Εκδ. ΤΕΙ Πειραιά
4. A.S.M Metals Handbook: 'Volume 15: Castings', 1992
5. A.S.M Metals Handbook: 'Volume 3: Alloy phase diagrams'
6. J. E. Sopcak: 'Lost wax or investment casting', Εκδ. Gem Guides Book Company
7. J. Campel: 'Castings', Εκδ. Butterworth Heinemann
8. J. Carvill: 'Mechanical Engineer's Data Handbook '
9. H. Hoffman: 'Casting metal parts'. Εκδ. Action Book Publishers, 2002
10. A.S.M Metals Handbook: 'Volume 02: Properties and Selection Nonferrous Alloys and Special Purpose Materials', 1992
11. Ξ. Κακάτσιος: 'Μετάδοση Θερμότητας', Εκδ. Κλειδάριθμος, 2004
12. Ho K., Pehlke PD., "Transient methods for determination of metal-mold interfacial heat transfer during solidification simulation and its use in optimal feeding design of casting", Metal Trans B 29B:703.
13. Ho K., Pehlke PD., "Mechanisms of heat transfer at a metal-mold interface", AFS Trans 1984;92:587
14. Ho K., Pehlke PD., "Metal=mold interfacial heat transfer", Metal Trans B 1985;16b:585
15. Nishida Y., Droste W, Engler S., :The air gap formation process at the casting-mold interface, and the heat transfer mechanism through the gap", Metal B 1986;17B:833
16. Stafford RO, Rice AB, Pimella DF. "Investment Casting Process Design-part 2: solidification simulation", solidification simulation. ASME Int Conf Comp Eng 1987;2:437.
17. Gozlan E, Bamberger M. "Heat flow and solidification in a metal mold", Z-Metall 1987;78_9:677

18. Kumar TSP, Prabhu KN. “Heat flux transients at the casting chill interface during solidification of aluminium base alloys”, Metall Trans B 1991.
19. Krishnan M, Sharma DGR. “Determination of heat transfer coefficient between casting and chill in unidirectional heat flow”. AFS Trans 1994.
20. Kim T-G, Lee Z-H. “Time varying heat transfer coefficients between tube-shaped casting and metal mold” Int J Heat Mass Transfer 1997.
21. T. S. Piwonka, K.A Woodbury, J.M. Wiest, “Modeling casting dimensions: effects of wax rheology and interfacial heat transfer”, Materials and design 21, 2000.
22. Beck JV. “Thermocouple temperature disturbances in low conductivity molds”. Trans ASME 2000.
23. Wu Shi Ping, Liu Dong Rong, Guo Jing Jie, Li Chang Yun, Su Yan Qing, Fu Heng Zhi “Numerical simulation of microstructure evolution of Ti-6Al-4V alloy in vertical centrifugal casting”, 2006.
24. G. Chirita, D. Soares, F.S. Silva “Advantages of the centrifugal casting technique for the production of structural components with Al–Si alloys”, 2006
25. P.X. Fu, X.H. Kang, Y.C. Ma, K. Liu, D.Z. Li, Y.Y. Li, “Centrifugal casting of TiAl exhaust valves”, 2007.
26. Wu M, Augthun M, SchaEdlich-Stubenrauch J, Sahm PR, Spiekermann H., “Numerical simulation of porosity-free titanium dental castings”, 1999.